

# Étude de l'usinabilité par fraisage d'un nouvel alliage d'aluminium MS43 à très haut pourcentage de silicium

par

Oussama CHAIEB

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE  
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE  
M. Sc. A

MONTREAL, LE 04 JUIN 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie.  
document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie import  
document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

## **PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Victor SONGMENE, directeur de mémoire  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Mohammad JAHAZI, codirecteur de mémoire  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Anh-Dung NGÔ, président du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Marek BALAZINSKI, membre du jury externe  
Département de génie mécanique à l'École Polytechnique de Montréal

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 15 MAI 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE





## **REMERCIEMENTS**

Je tiens d'abord à exprimer ma sincère reconnaissance envers mes directeurs de recherche, Professeur Victor Songmene et Professeur Mohammad Jahazi pour leur encadrement et les remercier pour le support et la patience qu'ils ont manifestée à mon égard pour mener à bien réaliser ce mémoire.

Je tiens à remercier les membres du jury qui me font l'honneur d'examiner mon travail. Ainsi que les partenaires industriels, MDA Corporation, NÉTUR et le Centre de Métallurgie du Québec CMQ. J'apprécie aussi le soutien financier du Centre de recherche sur l'aluminium, RÉGAL et Mitacs est également grandement apprécié.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues d'école, surtout Abdelatif Bouzid et à l'École de technologie supérieure. Merci aussi à Éric Marcoux de m'avoir supporté gentiment au niveau des tests.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance et ma gratitude envers ma famille et en particulier envers ma mère pour tout ce qu'elle m'a offert.



# **ÉTUDE DE L'USINABILITÉ PAR FRAISAGE D'UN NOUVEL ALLIAGE D'ALUMINIUM MS43 À TRÈS HAUT POURCENTAGE DE SILICIUM**

Oussama CHAIEB

## **RÉSUMÉ**

Pour satisfaire les besoins et les performances des produits, l'industrie aéronautique a de plus en plus besoin de comprendre le comportement des matériaux et leurs procédés de fabrication, pour assurer une bonne usinabilité ainsi qu'une haute performance de produits et de durée de vie en service plus longue.

Dans ce sens, notre étude a pour objectif d'investiguer les interactions outil/matière et leurs effets sur l'intégrité de surface lors du fraisage des alliages d'aluminium à haut pourcentage de silicium ainsi que l'usinabilité de ce dernier.

Le but alors est d'optimiser les paramètres de coupe afin d'avoir une meilleure intégrité de surface et assurer la fonctionnalité du produit. Pour ce fait, des éprouvettes ont été fraisées sous différentes conditions de coupe (vitesse de coupe et avance par dent) et pour de différents diamètres d'outils dans le but de développer une approche globale pour prédire la rugosité de surface. Suite à une analyse, les résultats ont montré que la rugosité de surface augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance et la vitesse de coupe, qui sont les paramètres les plus significatifs sur la rugosité. Cependant, l'augmentation de l'avance par dent a intensifié la rugosité, mais d'une contribution moins faible que la vitesse de coupe. D'autre part, des contraintes à tendances compressives dans le sens de déplacement de l'outil et des contraintes de traction perpendiculairement au sens de déplacement de l'outil, ont été perçues en surface, en augmentant la vitesse de coupe il y a un point des paramètres de coupe au-delà de laquelle, les efforts de coupe augmentent énormément. On a constaté aussi que la vitesse de coupe influe considérablement la vibration c.-à-d. l'augmentation de la vitesse de coupe provoque la vibration de l'outil et donc une diminution de la qualité de surface. Un choix judicieux de la vitesse de coupe et l'avance par dent permet un état de fonctionnement de l'outil favorable avec des efforts de coupe stables et modérés et moins de vibration.

Des corrélations ont été établies entre l'état de surface, les efforts de coupe, la vibration et les paramètres empiriques de coupe. En se basant sur une analyse statistique qui prend en compte les efforts de coupes, la vibration de la pièce et les défauts de la microstructure, une recommandation des paramètres de coupe optimaux qui favorise l'usinabilité de l'alliage MS43 pour différents diamètres d'outil a été proposée.

Après des tests de validations, un bon accord a été observé entre les valeurs prédites et mesurées avec une erreur maximale de l'ordre de 14,25 %.

**Mots-clés :** aluminium silicium MS43, fraisage, rugosité de surface, efforts de coupe.



# **STUDY OF MACHINABILITY BY MILLING OF A NEW ALUMINUM ALLOY MS43 AT A VERY HIGH PERCENTAGE OF SILICON**

Oussama CHAIEB

## **ABSTRACT**

To satisfy the needs and performance of products, the aerospace industry increasingly needs to understand the behaviour of materials and their manufacturing processes, to ensure good machinability as well as high product performance and longer service life.

In this sense, our study aims to investigate the tool / material interactions and their effects on surface integrity during milling of high silicon aluminum alloys as well as its machinability.

The goal then is to optimize the cutting parameters in order to have a better surface integrity and ensure the functionality of the product. For this fact, specimens were milling under different cutting conditions (cutting speed and feed per tooth), and for different tool diameters in order to develop a global approach to predict surface roughness. Following an analysis, the results showed that the surface roughness increases with the increase of the feed rate and the cutting speed, which are the most significant parameters on the roughness. However, the increase in the feed per tooth intensified the roughness but with a lower contribution than the cutting speed.

On the other hand, constraints with compressive tendencies in the direction of movement of the tool, and tensile stresses perpendicular to the direction of movement of the tool were perceived on the surface, increasing the cutting speed there is a point cutting parameters beyond which, the cutting forces increase enormously. It has been found that the cutting speed has a considerable effect on vibration, i.e. the increase of the cutting speed causes the vibration of the tool and therefore a decrease in the surface quality. A judicious choice of cutting speed and feed per tooth, allows a favourable tool operating condition with stable and moderate cutting forces and less vibration.

Correlations were established between surface state, cutting forces, vibration and the cutting parameters. Based on a statistical analysis that takes into account the cutting forces, the vibration of the part and the microstructure defects, a recommendation of the optimal cutting parameters that favours the machinability of the MS43 alloy for different diameters of the tool was proposed.

After validation tests, good agreement was observed between the predicted and measured values with a maximum error 14.25 % for the three samples.

**Keywords :** silicon aluminum MS43, machining, surface roughness, cutting forces.



## TABLE DES MATIÈRES

		Page
INTRODUCTION .....		1
CHAPITRE 1	REVUE SUR L'USINAGE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM UTILISÉS EN AÉROSPATIALE .....	5
1.1	Introduction.....	5
1.2	Problèmes rencontrés pendant l'usinage des alliages d'aluminium en aéronautique ....	5
1.2.1	Problème de formation des copeaux .....	6
1.2.2	Problème d'intégrité de la surface .....	7
1.2.3	Problème du fini de surface .....	7
1.3	Objectif de la recherche .....	8
1.4	Principes de l'usinage et processus de coupe .....	8
1.4.1	Usinage d'alliage d'aluminium pour l'aéronautique et l'aérospatial.....	10
1.4.2	Application des outils de coupe diamantés .....	20
1.4.3	Le perçage dans l'aluminium Silicium .....	23
1.5	Méthodologie de la recherche .....	25
1.6	Conclusion .....	28
CHAPITRE 2	CHOIX ET CARACTÉRISATION DE L'ALLIAGE D'ALUMINIUM À HAUT POURCENTAGE DE SILICIUM .....	29
2.1	Introduction.....	29
2.2	Choix de matériaux .....	29
2.3	Étude des caractéristiques du matériau choisi .....	34
2.3.1	Composition chimique de l'alliage .....	34
2.3.2	Étude de la dureté.....	37
2.3.3	Comparaison d'usinabilité .....	39
2.3.4	Analyse de traction .....	42
2.4	Analyse de la microstructure .....	45
2.4.1	Les défauts de la microstructure .....	47
2.4.2	Conductivité électrique .....	50
2.5	Conclusion .....	53
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE ET PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE.....	55
3.1	Introduction.....	55
3.2	Problématique .....	55
3.3	Objectifs.....	56
3.4	Méthodologie de travail .....	57
3.4.1	Plan d'expérience.....	57
3.4.2	Modélisation des réponses .....	58
3.4.3	Planification des essais expérimentaux.....	58
3.5	Équipements.....	60
3.5.1	Machine d'usinage .....	60

3.5.2	Rugosimètre .....	62
3.5.3	Microscope confocal .....	63
3.5.4	Accéléromètre .....	64
3.5.5	Dynamomètre .....	64
3.6	Conditions d'usinages .....	66
3.6.1	Outils de coupe .....	66
3.6.2	Paramètres de coupes .....	69
3.6.3	Stratégie d'usinage .....	70
3.6.4	Composantes de l'effort de coupe .....	71
3.6.5	Analyse de contraintes .....	72
3.6.6	Gamme de fabrication .....	74
CHAPITRE 4	RÉSULTATS ET DISCUSSION .....	77
4.1	Introduction .....	77
4.2	Étude de l'état de surface .....	77
4.2.1	Paramètres de rugosité de surface .....	77
4.2.2	Profils de rugosité de surface .....	78
4.2.3	Influence de paramètres de coupe sur la rugosité de surface .....	80
4.2.4	Paramètres d'amplitude de surface .....	84
4.2.5	Influence de diamètres d'outils sur la rugosité de surface .....	86
4.3	Contribution des paramètres de coupe à la variabilité de réponse .....	97
4.4	Optimisation de la rugosité de surface arithmétique surfacique Sa .....	99
4.5	L'influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe .....	100
4.6	L'influence de paramètres de coupe sur la vibration de la pièce .....	102
4.7	Effets de l'usinage sur la microstructure .....	105
4.8	Interpolation et courbes de prédiction des paramètres de coupe .....	109
4.9	Conclusion .....	113
CHAPITRE 5	VALIDATION DE RÉSULTATS .....	115
5.1	Introduction .....	115
5.2	Les essais de validation .....	115
5.2.1	Résultats est analyse de la rugosité .....	116
5.2.2	Exemples de profils de rugosité de surface .....	118
5.2.3	Résultat et analyse de la microstructure .....	120
5.3	Usure et dommage de l'outil .....	122
5.4	Conclusion .....	124
CONCLUSION	.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
RECOMMANDATIONS	.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
ANNEXE I	CHOIX D'OUTILS DE FRAISAGE .....	129
ANNEXE II	CHOIX D'OUTILS DE PERÇAGE .....	131



ANNEXE III	DESCRIPTION D'OUTIL SELON LE FOURNISSEUR « NIAGARA » .....	133
ANNEXE IV	SPECTRES DES FORCES ET DES VIBRATIONS .....	135
ANNEXE V	PARAMÈTRES DE RUGOSITÉ POUR TOUS LES OUTILS ET LES DEUX MATÉRIAUX .....	137
ANNEXE VI	DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DE RUGOSITÉ POUR LES DEUX MATÉRIAUX ET LES PARAMÈTRES DE COUPES SÉLECTIONNÉS.....	147
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		<b>Erreur ! Signet non défini.</b>



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1 Paramètres de coupe pour une matrice .....	16
Tableau 1-2 La composition chimique d'Al-SiC –MMC .....	18
Tableau 1-3 Propriétés physiques et mécaniques d'Al-SiC –MMC (Ramanujam, Muthukrishnan et Raju, 2011) .....	19
Tableau 1-4 Paramètres d'usinage et de leurs niveaux respectifs (Ramanujam, Muthukrishnan et Raju, 2011) .....	19
Tableau 1-5 Résultats de la performance d'usinage à l'aide de paramètres initiaux (Ramanujam, Muthukrishnan et Raju, 2011).....	19
Tableau 2-1 Présentation des propriétés mécaniques de différents matériaux .....	31
Tableau 2-2 Comparaison et sélection du métal .....	32
Tableau 2-3 Recommandations des paramètres de coupes selon la nuance du métal à couper «harvy tool».....	33
Tableau 2-4 Fraction volumique de phase .....	36
Tableau 2-5 Pourcentage des éléments d'additions .....	37
Tableau 2-6 Caractéristiques d'outil, et paramètres de coupe recommandés par les fournisseurs Harvey.....	40
Tableau 2-7 Caractéristiques mécaniques de l'alliage MS43 .....	44
Tableau 3-1 Plan d'expérience pour cinq différents diamètres d'outil .....	58
Tableau 3-2 Configuration de la machine selon les paramètres exigés/recommandés .....	61
Tableau 3-3 Description des phases et des opérations à appliquer avec les exigences imposées .....	68
Tableau 3-4 Les propriétés mécaniques de l'alliage 6061 (Matweb, 2017) .....	72
Tableau 4-1 Caractéristiques de l'outil utiliser pour les essais.....	78
Tableau 4-2 Résultat des différents paramètres de rugosité et de coupe .....	85
Tableau 4-3 Caractéristiques des outils utilisés .....	86

Tableau 4-4	Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T1 .....	106
Tableau 4-5	Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T2 .....	106
Tableau 4-6	Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T3 .....	106
Tableau 4-7	Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T4 .....	107
Tableau 4-8	Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T5 .....	108
Tableau 4-9	Paramètres de coupe recommandés deux matériaux et différents diamètres.....	109
Tableau 4-10	Tableau des paramètres de coupes recommandées pour le matériau MS43.....	112
Tableau 5-1	Paramètres de coupe utilisés pour les essais de validation .....	116
Tableau 5-2	Résultats et précision des essais de validation.....	117
Tableau 5-3	Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T1 .....	120
Tableau 5-4	Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T2 .....	121
Tableau 5-5	Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T3 .....	121

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1-1	Les trois zones caractérisant le contact du triplet pièce-outil-copeaux.....9
Figure 1-2	Qualité du fini de surface : (a) grande charge à sec (b) charge faible avec lubrification, (c) grande charge avec lubrification tiré de (Davis et Eyre, 1994) .....11
Figure 1-3	Microstructure des alliages Al-Si par rapport à la teneur en Si tiré de (Nikanorov et al., 2005) .....12
Figure 1-4	Effet de la fraction volumique de Si et SiCp contenu dans l'aluminium sur la rugosité tiré de (Zhang et al., 2007) .....14
Figure 1-5	Micrographie de Al/SICP + SICP avec différentes fractions volumiques tirées de (Zhang et al., 2007) .....15
Figure 1-6	La résistance à la flexion moyenne et la dureté Vickers par rapport à la fraction volumique SICP tirée de (Zhang et al., 2007) .....16
Figure 1-7	Effet de la fraction volumique de SICP sur la dureté de VB tiré de (Zhang et al., 2007) .....17
Figure 1-8	Histogrammes montrant les performances de quatre outils de fraisage similaires de haute qualité tirée de (Wilks, 1980) .....20
Figure 1-9	Caractéristique de deux outils de fraisage sans et avec revêtement tiré de (Kanda et al., 1995) .....22
Figure 1-10	Relation entre la résistance à la rupture transversale et l'épaisseur du film de diamant tiré de (Kanda et al., 1995) .....23
Figure 1-11	Comparaison des réponses de couple de perceuses HSS (à sec et inondé) avec les exercices DLC revêtus à l'état sec tiré de (Bhowmick et Alpas, 2008) .....25
Figure 1-12	Diagramme de performance et de fonctionnalité du produit .....26
Figure 2-1	Microstructure, dureté et composition du matériau RSP 413-6 F, tiré de Alshmri et al. (2014) .....35
Figure 2-2	Fraction volume des éléments d'alliage étudié MS43 .....36
Figure 2-3	Courbe de diffraction de rayon X .....37

Figure 2-4	Distribution de la dureté HRB sur l'échantillon MS43 découpé transversalement .....	38
Figure 2-5	Distribution de la dureté HRB sur l'échantillon MS43 découpé longitudinalement .....	39
Figure 2-6	Analyse de la rugosité des alliages d'aluminium silicium MS43, MS-61 et ALM-450 .....	41
Figure 2-7	Image d'outil utilisé sur l'alliage MS43, montrant l'usure sur l'arrêt de coupe .....	42
Figure 2-8	Courbe d'allongement en fonction de l'allongement.....	43
Figure 2-9	Courbe de traction de l'alliage d'aluminium silicium MS43.....	44
Figure 2-10	Fissure sous l'effet de l'effort de traction sur l'alliage d'aluminium silicium MS43 .....	45
Figure 2-11	Surface de rupture de l'alliage d'aluminium silicium MS43 .....	45
Figure 2-12	Microstructure des alliages Al-Si par rapport à la teneur en Si tiré de Nikanorov et al. (2005) : (a) 11,5 %, (b) 20 %, (c) 25 %, (c) 30 %, (d) 35 %, de Silicium .....	46
Figure 2-13	Microstructure MS431 .....	47
Figure 2-14	Microstructure MS43 .....	48
Figure 2-15	Microstructure 10 % SiC 7.7 % Si, tiré de Nikanorov et al. (2005) .....	48
Figure 2-16	La taille des grains de Si en fonction de la température, tiré de Birol (2007).....	49
Figure 2-17	Microstructure de l'alliage étudié MS43 .....	49
Figure 2-18	Conductivités électriques des alliages Al-Si-Mg et Al-Si- Mg-Sr, tiré de Mulazimoglu, Drew et Gruzelski (1989).....	51
Figure 2-19	Variations de la conductivité électrique en fonction de déplacement de l'électrode sur la surface de l'alliage MS43.....	52
Figure 2-20	Qualité de surface Sa ( $\mu\text{m}$ ) de la face usinée .....	52
Figure 3-1	Point de fonctionnement de la machine .....	62
Figure 3-2	Microscope laser utilisé pour la mesure de rugosité .....	63

Figure 3-3	Microscope confocal à balayage laser .....	64
Figure 3-4	Efforts de coupe .....	65
Figure 3-5	Efforts de coupe au fraisage (Balazinski, 2009) .....	65
Figure 3-6	Système d'acquisition dynamométrique Kistler 9255B .....	65
Figure 3-7	«Generative Structural Analysis» du logiciel de CAO .....	73
Figure 3-8	Simuler les contraintes de « Von Mises ».....	73
Figure 4-1	Rugosités de surface .....	79
Figure 4-2	Rugosité de surface .....	79
Figure 4-3	L'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface lors de l'usinage de MS43.....	80
Figure 4-4	L'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface lors de l'usinage de 6061-T6.....	81
Figure 4-5	L'influence de vitesse de coupe $V_c$ sur la rugosité.....	82
Figure 4-6	L'influence de vitesse d'avance $F_z$ sur la rugosité.....	82
Figure 4-7	Comparaison de l'influence de paramètres de coupe entre les deux matériaux MS43 et 6061-T6 .....	84
Figure 4-8	Comparaison de paramètres de rugosité de deux matériaux.....	86
Figure 4-9	Outil T1, effet de la vitesse de coupe sur la rugosité arithmétique surfactive $S_a$ .....	87
Figure 4-10	Outil T1, effet de l'avance par dent sur la rugosité arithmétique surfactive $S_a$ .....	88
Figure 4-11	Outil T2, effet de la vitesse de coupe sur la rugosité arithmétique surfactive $S_a$ .....	88
Figure 4-12	Outil T2, effet de l'avance par dent sur la rugosité arithmétique surfactive $S_a$ .....	89
Figure 4-13	Outil T3, effet de la vitesse de coupe sur la rugosité arithmétique surfactive $S_a$ .....	89
Figure 4-14	Outil T3, effet de l'avance par dent sur la rugosité arithmétique surfactive $S_a$ .....	90

Figure 4-15	Outil T4, effet de la vitesse de coupe sur la rugosité arithmétique surfacique Sa.....	90
Figure 4-16	Outil T4, effet de l'avance par dent sur la rugosité arithmétique surfacique Sa.....	91
Figure 4-17	Outil T5, effet de la vitesse de coupe sur la rugosité arithmétique surfacique Sa.....	91
Figure 4-18	Outil T5, effet de l' avance par dent sur la rugosité arithmétique surfacique Sa.....	92
Figure 4-19	Moyenne de la rugosité pour différentes avances VS vitesse de coupe ....	94
Figure 4-20	Moyenne de la rugosité pour différentes vitesses de coupe VS avance par dent (Outil T1) .....	94
Figure 4-21	Moyenne de la rugosité pour différentes avances VS vitesse de coupe ....	94
Figure 4-22	Moyenne de la rugosité pour différentes vitesses de coupe VS avance par dent (Outil T2) .....	94
Figure 4-23	Moyenne de la rugosité pour différentes avances VS vitesse de coupe ....	95
Figure 4-24	Moyenne de la rugosité pour différentes vitesses de coupe VS avance par dent (Outil T3) .....	95
Figure 4-25	Moyenne de la rugosité pour différentes avances VS vitesse de coupe ....	95
Figure 4-26	Moyenne de la rugosité pour différentes vitesses de coupe VS avance par dent (Outil T4) .....	95
Figure 4-27	Moyenne de la rugosité pour différentes avances VS vitesse de coupe ....	96
Figure 4-28	Moyenne de la rugosité pour différentes vitesses de coupe VS avance par dent (Outil T5) .....	96
Figure 4-29	Contribution des paramètres de coupe à la variabilité (Outil T1).....	97
Figure 4-30	Contribution des paramètres de coupe à la variabilité (Outil T2).....	97
Figure 4-31	Contribution des paramètres de coupe à la variabilité (Outil T3).....	98
Figure 4-32	Contribution des paramètres de coupe à la variabilité (Outil T4).....	98
Figure 4-33	Contribution des paramètres de coupe à la variabilité (Outil T5).....	98
Figure 4-34	Comportement de paramètres de rugosité avec les différents outils.....	99



Figure 4-35	Comportement de l'effort .....	101
Figure 4-36	Comportement de l'effort .....	101
Figure 4-37	Comportement de l'effort .....	102
Figure 4-38	Comportement de l'effort .....	102
Figure 4-39	Comportement de la vibration en fonction de la variation de vitesse de coupe, l'alliage MS43 .....	104
Figure 4-40	Comportement de la vibration en fonction de la variation de l'avance par dent, l'alliage MS43 .....	104
Figure 4-41	Comportement de la vibration en fonction de la variation de vitesse de coupe, l'alliage Al6061-T6 .....	105
Figure 4-42	Comportement de la vibration en fonction de la variation de l'avance par dent, l'alliage Al6061-T6.....	105
Figure 4-43	Variation de la rugosité en fonction des paramètres de coupe et les diamètres d'outils (MS43) .....	110
Figure 4-44	Variation de la rugosité en fonction des paramètres de coupe et les diamètres d'outils (Al6061-T6) .....	111
Figure 5-1	Exemples de profils de rugosité de surface pour le MS-43 pour les paramètres de coupe indiqués .....	119
Figure 5-2	Diagramme de la rugosité Sa pour les échantillons de validation .....	119
Figure 5-3	Image montrant l'usure de dépouille d'outil.....	123
Figure 5-4	Image montrant les fractures de l'outil .....	123
Figure 5-5	Image montrant l'aluminium fondu et coller sur l'outil de coupe .....	124



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

BUL Built-Up Layer

BUE Built-Up Edge

DLC Diamond-like carbon (outil revêtu en carbure de diamant).

HSS High- speed steel (outils en matériaux conventionnels ou acier rapide).

CVD Chemical Vapour Deposition.

PCD Polycrystalline Diamond.

ISO International Organization of Standardization

EDX Energy Dispersive Using X-Ray

CN Commande Numérique



## INTRODUCTION

Dans l'industrie aéronautique, une importance particulière est toujours donnée à la performance en service et à la fiabilité des pièces. Pour satisfaire ce besoin, nous nous sommes intéressés au comportement des matériaux et leurs procédés de fabrication.

L'amélioration de la durée de vie en service et la performance des pièces usinées exige une maîtrise ainsi qu'un contrôle des facteurs et des conditions de fonctionnement et de fabrication. Dans ce cadre, notre étude a pour objectif d'investiguer les interactions outil/matière et leurs effets sur l'intégrité de surface lors de l'usinage conventionnel des alliages d'aluminium à haut pourcentage de silicium, utilisés dans la fabrication des pièces de précision en industrie aéronautique. Le matériau d'étude est un alliage d'aluminium silicium MS43 et un alliage 6061-T6 pour la comparaison des résultats. L'alliage MS43 a été produit par le refroidissement ultra rapide ( $54 \pm 4$  HRB). Ce matériau a été choisi dans le but d'améliorer le coefficient de dilatation thermique pour le duplexeur du radar de satellites.

Le but alors est d'étudier l'usinabilité et d'optimiser les paramètres de coupe afin d'avoir une meilleure qualité de surface et garantir la fonctionnalité du produit. Pour ce faire, des éprouvettes ont été usinées en contournage sous différentes conditions de coupe (vitesse de coupe et avance par dent) et pour différents diamètres d'outils (entre 1.194 mm et 6.350 mm) dans le but de développer une approche globale pour prédire le comportement et faire des recommandations. Un modèle expérimental de prédiction pour la rugosité de surface et de recommandation des paramètres de coupes optimaux a été suggéré. L'optimisation des paramètres de coupe proposée permet de garantir une meilleure qualité de surface, une meilleure durée de vie de l'outil, un minimum de défauts microstructuraux et, par la suite, une meilleure performance en service du produit.

Trois étapes ont été élaborées dans cette approche. Premièrement, nous avons établi un plan d'expérience factoriel complet (un facteur à la fois), et les conditions de coupe ont été choisies tout en respectant le plan factoriel à deux facteurs (vitesse de coupe et avance par dent) et cinq niveaux pour cinq différents diamètres d'outil. Les effets des facteurs technologiques (la vitesse de coupe et l'avance par dent), et physiques (efforts de coupe et vibration) sur les caractéristiques de l'intégrité de surfaces et la microstructure ont été explorés.

Dans le cas de l'usinage de l'alliage aluminium silicium, les résultats ont montré que la rugosité de surface augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance et la vitesse de coupe, qui sont les paramètres les plus significatifs sur la rugosité. La formation des ondulations s'est intensifiée pour les vitesses de coupe élevées. Cependant, l'augmentation de l'avance par dent à augmenter la rugosité, mais d'une contribution moins faible que la vitesse de coupe. D'autre part, des contraintes à tendances compressives dans le sens de déplacement de l'outil et des contraintes de traction perpendiculairement au sens de déplacement de l'outil et sur le plan de coupe ont été perçues en surface. En augmentant la vitesse de coupe, il y a un point des paramètres de coupe au-delà duquel, les efforts de coupe augmentent énormément.

L'étude a montré, également, qu'avec un choix judicieux de la vitesse de coupe et d'avance, il est possible de générer un état de fonctionnement de l'outil favorable avec des efforts de coupe stables et modérés. Dans cette étape, des corrélations ont été établies entre l'état de surface, les efforts de coupe, la vibration et les paramètres de coupe.

L'étude expérimentale et l'analyse ont été appliquées sur la vibration des échantillons au cours de l'usinage desquels les comportements des amplitudes ont été étudiés. On a constaté que la vitesse de coupe influe considérablement sur la vibration et que cette influence produit un mauvais fini de surface c'est-à-dire l'augmentation de la vitesse de coupe provoque la vibration de l'outil et donc une diminution de la qualité de surface. Dans cette première partie, l'outil T3 de diamètre 3.175 mm a été utilisé et nous avons révélé que le matériau et la vitesse de coupe étaient les facteurs les plus significatifs suite à une analyse globale des effets et interactions des contraintes. L'alliage MS43 a présenté une mauvaise performance avec des valeurs des paramètres de coupes les plus élevées, suivi par l'Al6061-T6. Le compromis entre tous les résultats de cette partie nous a permis de sélectionner les paramètres de coupes optimaux qui maximisent l'usinabilité de l'alliage MS43. Par conséquent, la deuxième étape de cette étude a porté sur le développement d'un modèle expérimental de prédiction de l'intégrité de surface et une recommandation des paramètres de coupe qui favorisent l'usinabilité de l'alliage MS43 pour différents diamètres d'outil, en se basant sur une analyse statistique qui tient compte des efforts de coupes, de la vibration de la pièce, des défauts de la microstructure et des faces fonctionnelles de l'outil de coupe.

Pour ce faire, nous avons réalisé la même démarche appliquée avec l'outil T3 dans la première partie sur quatre autres outils de même géométrie et de mêmes caractéristiques, mais de diamètres différents.

Finalement, le modèle expérimental établi dans la deuxième étape a été, par la suite, utilisé pour la fabrication de la pièce finale après la réalisation de tests de validation. Nous avons validé les résultats du modèle par un choix de trois outils de différents diamètres, appliqué des tests d'usinage avec les paramètres de coupes recommandés et analysé les résultats par la suite. Les résultats prédits (rugosité surfacique arithmétique et paramètres d'amplitudes) ont été comparés avec les données du modèle expérimental, couvrant les conditions de coupe (vitesse de coupe et avance par dent). Un bon accord a été observé entre les valeurs prédites et mesurées avec une précision qui dépassent 87 % pour les trois échantillons.

Dans cette partie aussi, pour la réalisation des pièces finales pour la société mère MDA corporation, nous avons travaillé sur la gamme d'usinage, le choix des outils de coupe, les fixtures pour la mise et le maintien en position de la pièce ainsi que le programme d'usinage. Tout a été effectué sous la supervision et l'assistance de l'équipe technique chez Nétur. Cette partie du travail a été réalisée pour optimiser le coût de fabrication à partir de l'optimisation du nombre de phases et du nombre d'outils.

Par cette étude, nous avons pu mettre en évidence l'usinabilité de deux classes d'alliages d'aluminium 6061-T6 et MS43. Différents phénomènes physiques, mécaniques et leurs effets sur l'intégrité finie de surface ont été observés. Cette approche permettra d'optimiser le choix des paramètres de coupe afin d'améliorer l'intégrité de surface, la durée de vie des outils et favoriser les conditions de coupe pour différents diamètres d'outils. D'autre part, le modèle développé dans cette étude peut être généralisé pour la prédiction et la modélisation des autres procédés de fabrication ou leur amélioration par l'analyse des autres paramètres d'usinage.

La répartition du travail est la suivante :

Le chapitre 1 est une revue de la littérature sur l'usinage des alliages d'aluminium durs et composite en silicium. L'accent est mis sur l'usinabilité et les caractéristiques d'intégrité de la surface.

Le chapitre 2 présente la problématique, les objectifs, les matériaux utilisés, les conditions et paramètres expérimentaux étudiés, le choix du plan d'expériences, les équipements ainsi qu'une partie sur la préparation du matériel et de la gamme de fabrication pour les pièces finies.

Le chapitre 3 a pour objectif de maîtriser les caractéristiques mécaniques et métallurgiques du métal MS43 avant les essais. Le processus d'identification des échantillons est divisé en quatre parties : des essais de traction, de conductivité électrique, de dureté et l'analyse de la microstructure. Nous avons ensuite comparé nos résultats avec ceux des banques de données et de la littérature.

Le chapitre 4 présente et discute les résultats avec une étude des effets des conditions de coupe sur les paramètres de rugosité de surface, une analyse de la vibration de la pièce, des effets de coupe et de la microstructure. Les paramètres de coupe optimale enregistrés ont été étudiés pour générer un modèle expérimental qui recommande des paramètres de coupes optimaux pour différents outils avec une prévision de la valeur de rugosité arithmétique surfacique. De plus, nous avons traité l'endommagement ou bien les défauts qui apparaîtraient sur les différentes faces fonctionnelles de l'outil de coupe. À la fin, des essais de validation ont été appliqués pour vérifier l'efficacité et la précision du modèle suggéré dans le chapitre 5.



## **CHAPITRE 1**

### **REVUE SUR L'USINAGE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM UTILISÉS EN AÉROSPATIALE**

#### **1.1 Introduction**

Le présent chapitre organisé en quatre parties présente une revue critique de la littérature sur les différents modes d'usinage (fraisage, perçage, taraudage et alésage) des alliages d'aluminium à haut pourcentage de silicium utilisé dans l'industrie aéronautique et aérospatiale, plus précisément pour la fabrication du duplexeur du radar de satellites. Tous les modes de fabrication mentionnés seront utilisés pour la fabrication du produit. Après avoir présenté la problématique de ce travail de recherche, nous exposons en deuxième partie les résultats des travaux menés par plusieurs chercheurs, qui analysent les problèmes des paramètres de coupe, l'état de surface et de la microstructure du matériau, de la durée de vie de l'outil lors de l'usinage des alliages d'aluminium. Dans la troisième partie, nous fixons les objectifs de notre recherche. La dernière partie est consacrée à la méthodologie adoptée pour résoudre le problème posé.

#### **1.2 Problèmes rencontrés pendant l'usinage des alliages d'aluminium en aéronautique**

Les pièces à usiner en aéronautique et en aérospatiale sont caractérisées par la complexité de formes, de précision et de qualité. Le volume de métal à enlever lors de l'usinage de ces pièces est généralement élevé, ce qui augmente le coût et le temps d'usinage. La plupart des sociétés d'usinage aéronautique ont intégré l'usinage à grande vitesse pour être plus efficaces et concurrentielles. L'optimisation des paramètres de coupes augmente le taux d'enlèvement de métal (Rao et Shin, 2001). Cependant, cela entraîne le problème de gestion du copeau, de l'intégrité de la surface (propriétés mécaniques) et de la qualité du fini de surface des pièces usinées (Pawade, Joshi et Brahmanekar, 2008).

### 1.2.1 Problème de formation des copeaux

L'une des difficultés rencontrées pendant l'usinage des alliages d'aluminium (matériaux ductiles) est leur tendance à former des copeaux longs pendant l'usinage. Deux principaux problèmes sont rencontrés :

- La *Built-Up Layer* (BUL), qui est une partie du matériel enlevé qui colle à la face de dégagement de l'outil, sous l'effet de la haute pression et de la température pendant le contact outil -matière.
- La *Built-Up Edge* (BUE), qui est une partie du matériel enlevé qui colle à la fine pointe de l'outil dans des conditions spécifiques de coupe.

Pour surmonter ces difficultés, de nombreuses recherches ont été effectuées afin d'optimiser l'usinage de ces alliages. Les outils en carbure cémenté sont souvent utilisés dans l'usinage d'alliages d'aluminium. Cependant, ce type d'outil favorise la formation de la BUL sur la face de l'outil de coupe (Gangopadhyay et al., 2010). D'autre part, la BUL pourrait être minimisée d'une manière significative en utilisant les outils en diamant Chemical Vapour Deposition (CVD) et Polycrystalline Diamond (PCD), même à une faible vitesse de coupe (autour de 200 m/min) (Carrilero et al., 2002). La morphologie et les mécanismes conduisant à la formation de BUE et BUL lors de l'usinage ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. La morphologie du copeau a été étudiée dans le travail de Rao et Shin (2001) au cours du fraisage à grande vitesse de l'alliage 7075-T6. Dans leur étude, ils n'ont pas observé de variation significative de la morphologie du copeau avec des changements de la vitesse et de la profondeur de coupe utilisée. Cependant, la morphologie du copeau est plus sensible à la variation de l'alimentation.

La formation des copeaux segmentés a été étudiée au cours de l'usinage à grande vitesse de l'alliage Al-7075-T651 (Campbell et al., 2006). Les auteurs ont utilisé la métallographie optique avec contraste d'interférence différentiel le (DIC) pour identifier la région de la bande de cisaillement. Ils ont constaté en plus que, pour l'angle de coupe nulle, la distance entre les bandes de cisaillement n'est pas modifiée de manière significative avec la variation de la vitesse de coupe. Cependant, la largeur de la bande de cisaillement augmente avec la vitesse

de coupe. Enfin, Campbell et al. (2006) ont démontré que la recristallisation dynamique se produit dans les bandes de cisaillement des copeaux.

Mustafa et Tanju (2011) ont étudié l'usinabilité de l'Al 7075 en utilisant un outil de coupe en diamant. Les auteurs ont constaté que les paramètres qui agissent sur les forces de coupe sont la profondeur de coupe, la vitesse d'avance et la vitesse de rotation. Les forces de coupe (effet mécanique) et la production de chaleur (effet thermique) n'affectent pas seulement la formation des copeaux, mais influent également sur l'intégrité de surface, en particulier l'état des contraintes résiduelles dans la pièce à usiner en aluminium.

### **1.2.2 Problème d'intégrité de la surface**

La durée de vie des pièces en service est sensible à l'intégrité de la surface après usinage. Plus précisément, la résistance à la fatigue des alliages d'aluminium est sensible à la rugosité de surface et à la contrainte résiduelle telle qu'observée dans les travaux de recherche effectués par Suraratchai et al. (2008) et Chaussumier et al. (2013). Ainsi, il est intéressant de comprendre comment les caractéristiques d'intégrité de surface, en particulier, la finition de surface et les contraintes résiduelles ont été touchées lors de l'usinage d'alliages d'aluminium.

### **1.2.3 Problème du fini de surface**

La finition de surface qui comprend la topographie et les défauts de la surface usinée a été étudiée dans plusieurs études. Les paramètres de rugosité de surface sont de bons indicateurs de la qualité de la surface usinée. Les travaux de Ammula et Guo (2005) ont montré que la vitesse d'avance a un effet majeur sur la rugosité de surface par rapport à la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur l'alliage 6061-T651. Les tendances de rugosité de surface étaient souvent associées à la formation de la BUE. Gómez-Parra et al. (2013) ont montré que l'augmentation de BUE provoque une diminution de la rugosité Ra. En effet, la présence de la BUE augmente le rayon du bec d'outil, et par conséquent, améliore la rugosité de surface. Cependant, Iwata et Ueda (1980) ont déclaré que la BUE laisse des fissures sur la surface usinée. Donc elle augmente la rugosité de surface et détériore la résistance de la pièce. Li et al.

(2012) ont étudié l'effet de la haute vitesse de coupe sur l'intégrité de la surface d'alliage d'aluminium 7075. Leurs résultats ont montré un effet positif pour une vitesse de coupe élevée.

### **1.3 Objectif de la recherche**

Cette recherche vise à réaliser des analyses de la microstructure des différents métaux ainsi que des essais en variant les paramètres de coupe chez notre partenaire industriel Nétur (entreprises de fabrication des pièces pour l'aérospatial), pour gérer efficacement la production et la qualité des pièces à base des métaux spécifiques pour quelques applications précises. De plus, Nétur transmet les pièces finies (diplexeur) à un autre sous-traitant ayant en charge le revêtement de surface (placage d'argent). Les défis auxquels font face les entreprises d'aérospatiale telle que la compagnie Nétur, sont d'obtenir une rugosité maximale de  $32\text{ }\mu\text{m}$  et une planéité de  $0.0254\text{ mm}$  directement par outil coupant en fraisage de finition sur la face désignée par le dessin technique.

L'objectif de notre travail de recherche est de déterminer les paramètres de coupe favorables pour la fabrication des pièces respectant les exigences demandées (tolérances géométriques, dimensionnelles, qualité du fini de surface et la microstructure) afin d'assurer le placage et l'assemblage (qui seront appliquer par la société MDA corporation comme test de validation de fonctionnalité) tout en garantissant les exigences du client. Le processus d'obtention des pièces finies nécessite une phase de recherche pour choisir les bons paramètres qui vont permettre de satisfaire les exigences du cahier de charge, en particulier pour les applications spécifiques de l'aérospatial ou de l'aéronautique. Les essais vont être réalisés au sein des laboratoires de l'ÉTS et de celles des entreprises partenaires.

Avant d'élaborer la méthodologie de notre recherche, nous avons effectué une revue critique de la littérature des travaux effectués par des pairs afin de résoudre le problème posé.

### **1.4 Principes de l'usinage et processus de coupe**

Les procédés d'usinage par enlèvement de matière à l'aide des machines-outils sont considérés comme les procédés de mise en forme les plus précis et les plus performants. L'usinage est

une opération de mise en forme par enlèvement de matière dans le but d'aboutir à une forme voulue, tout en respectant les dimensions et l'état de surface prédéfinis par la tolérance donnée. En industrie, une combinaison entre un mouvement de coupe et un mouvement d'avance est nécessaire pour générer les formes demandées. La surface voulue est générée grâce à la forme et à la trace des arêtes d'outil. La stratégie d'usinage est aussi un aspect important, pour chaque géométrie à usiner on doit choisir la stratégie adéquate. Puisque la stratégie a une influence directe sur la qualité de surface, et en choisissant la meilleure stratégie on pourrait réduire le coût de production de 30 %.

Principalement, le processus de coupe consiste à enlever la matière puis évacuer le copeau afin d'avoir une pièce qui répond aux exigences du cahier de charge du concepteur. Ce processus met en jeu plusieurs phénomènes mécaniques, physiques et thermiques ayant lieu dans différentes zones et surfaces de coupe schématisées dans la figure 1.1.



Figure 1-1 : Les trois zones caractérisant le contact du triplet pièce-outil-copeaux

Les trois principales zones de coupe sont :

Zone 1 : Zone de cisaillement primaire dans laquelle il y a une élévation importante de la température sous l'effet d'une déformation plastique due à la séparation du métal.

Zone 2 : Zone de cisaillement secondaire qui subit une déformation plastique énorme due aux frottements entre le copeau et l'outil de coupe.

Zone 3 : Zone de cisaillement tertiaire entre la surface usinée et la face de dépouille et c'est la zone la moins endommagée des trois zones de coupe.

#### **1.4.1 Usinage d'alliage d'aluminium pour l'aéronautique et l'aérospatial**

Dans cette section, nous allons étudier l'effet de la teneur en silicium, l'effet des éléments d'additions, les propriétés structurales et mécaniques, l'usinabilité des matériaux durs ainsi que l'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface.

##### **1.4.1.1 L'effet de la teneur en silicium**

Dans les conditions d'usinage à sec, telles que le montre la figure 1.2, le taux d'usure augmente avec une diminution de la taille des particules de silicium, alors que dans les conditions lubrifiées, l'inverse a été observé et l'alliage présente une performance supérieure tel que démontré dans le travail de Davis et Eyre (1994). L'addition de silicium a augmenté la charge à partir de laquelle une usure métallique apparaissait. Cela était dû :

- Au silicium métallique qui limite bien l'effet de l'usure et de la fraction dans l'alliage de l'aluminium.
- À l'effet du silicium sur la résistance à la déformation résultante de l'alliage et sa capacité à supporter un film d'oxyde.

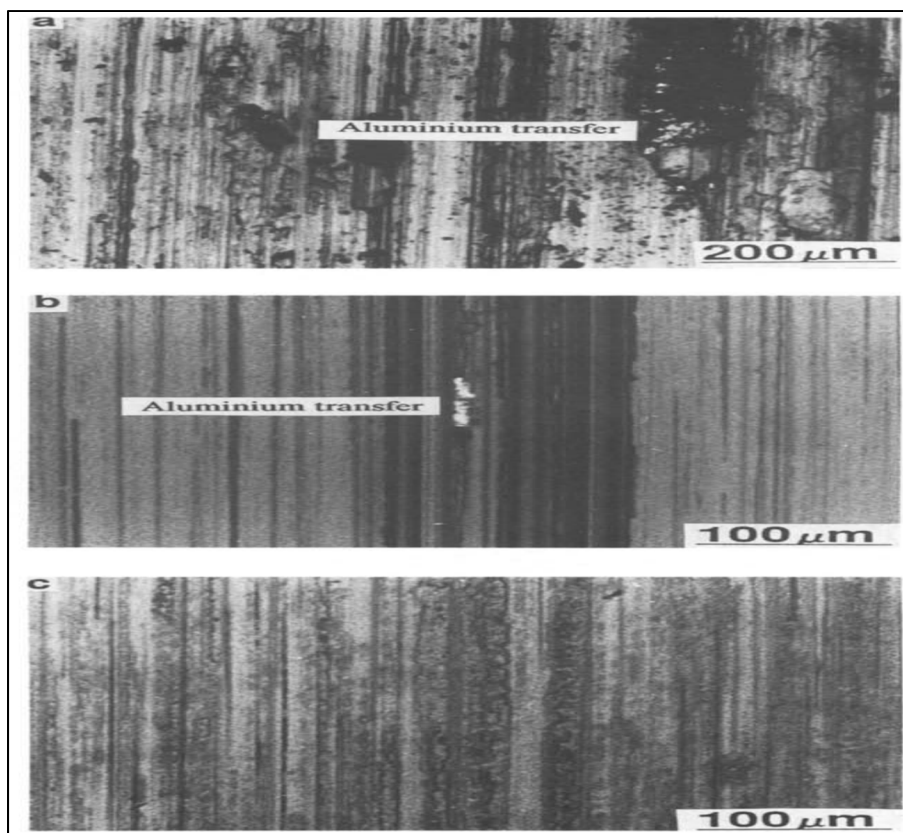


Figure 1-2 : Qualité du fini de surface : (a) grande charge à sec  
(b) charge faible avec lubrification, (c) grande charge  
avec lubrification tiré de (Davis et Eyre, 1994)

Dans les conditions de glissement à sec, le taux d'usure diminue avec le raffinement de la morphologie de silicium, alors que dans les conditions avec lubrifiant, l'inverse a été observé et l'alliage présentait une résistance supérieure à l'usure. Cette différence a été attribuée à des particules de silicium agissant comme un « pilote » et offrent une protection à l'usure de la matrice d'aluminium.

#### 1.4.1.2 Effet des éléments d'addition

Les effets des éléments d'additions et le traitement thermique sur l'usure des alliages d'aluminium-silicium eutectiques sont étudiés en usinage. Les surfaces d'usure et les débris ont été examinés par un microscope électronique à balayage. Deux types d'alliage d'aluminium ont été étudiés dans le travail de Harun, Talib et Daud (1996), l'un avec 12.3 % de silicium en plus du magnésium (Mg), du césium (Ce), du zinc (Zn) et du zirconium (Zr) et l'autre constitué

d'un alliage Al-Si uniquement. Les surfaces d'usure ainsi que les débris ont été comparés pour les deux alliages et les analyses ont montré que :

- La présence de magnésium, de cérium, de zirconium et de zinc dans l'alliage de Al-Si favorisent le phénomène de durcissement par vieillissement, grâce à la formation de précipités.
- Il y a une amélioration significative de la résistance à l'usure lorsque le Zr, le Ce et le Zn sont introduits dans les alliages Al-Si.
- Le traitement thermique améliore encore la résistance à l'usure de l'alliage Al-Si.
- Les alliages ne sont probablement pas adaptés aux applications à sec.

#### 1.4.1.3 Les propriétés structurales et mécaniques

Dans le travail de Nikanorov et al. (2005) l'observation par le microscope optique de l'évolution de la structure et les grains des échantillons moulés des alliages d'aluminium avec 11.5 %, 20 %, 25 %, 30 %, 35 %, de Silicium respectivement a révélé une structure à grains fins pour les échantillons préparés par trempe du métal liquide telle que le montre la figure 1.3.

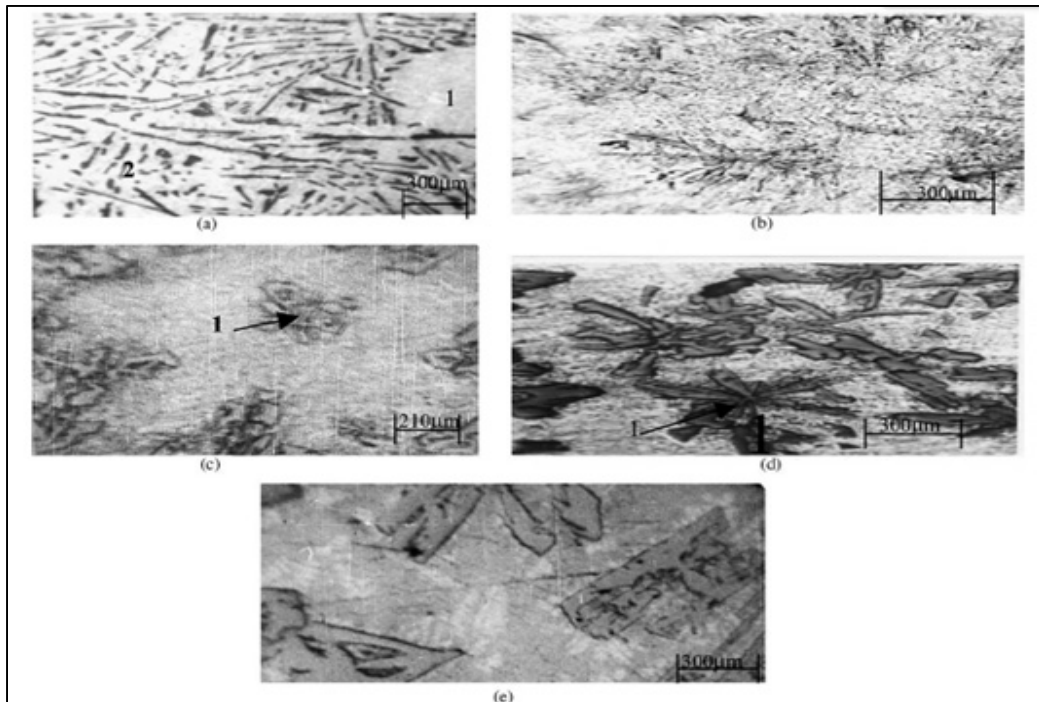


Figure 1-3 : Microstructure des alliages Al-Si par rapport à la teneur en Si  
tiré de (Nikanorov et al., 2005)



Dans la Fig. 1.3a, nous observons une structure eutectique avec des cristaux primaires de solution solide Al-Si 11.5 %.

L'alliage de 20 % de Si (Fig. 1.3b) a un meilleur grain eutectique anormal structuré.

Il existe des cristaux primaires de Si en forme d'étoile sur l'arrière-plan de la structure eutectique pour la composition de 25 % Si (Fig. 1.3c).

La concentration et la taille des cristaux primaires de Si augmentent avec l'augmentation de la teneur en Si (30 et 35 %).

#### **1.4.1.4 L'usinabilité des matériaux durs**

Andrewes, Feng et Lau (2000) (Zhang et al., 2007) ont traité les résultats expérimentaux sur l'usinabilité de l'aluminium renforcé par le silicium et de carbure de silicium (Al/Sip + SICP) au cours du processus de fraisage par un outil carbure. La fraction totale des renforts est de 65 % en volume. Les paramètres à mesurer au cours des expériences sont respectivement les forces de coupe, l'usure et durée de vie de l'outil ainsi que la qualité de la surface usinée.

Les résultats ont montré aussi que si on remplace la même fraction volumique des particules de silicium par du carbure de silicium tout en gardant la taille des particules, la résistance à la flexion et la dureté Vickers sont améliorées. Par conséquent l'usinabilité devient plus difficile. Ils ont également remarqué que l'effet de l'ajout du carbure de silicium sur l'usinabilité et la qualité de surface est optimal lorsque le pourcentage de ce dernier ne dépasse pas 9 % tel que le montrent les figures 1.4 et 1.5.

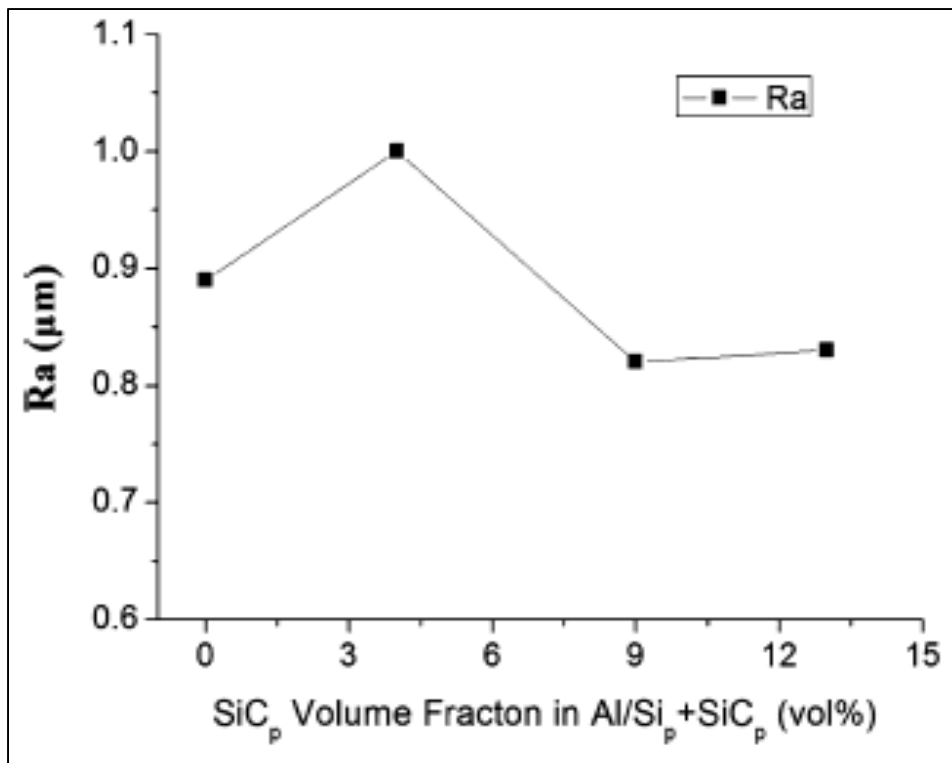


Figure 1-4 : Effet de la fraction volumique de Si et SiC<sub>p</sub> contenu dans l'aluminium sur la rugosité tiré de (Zhang et al., 2007)

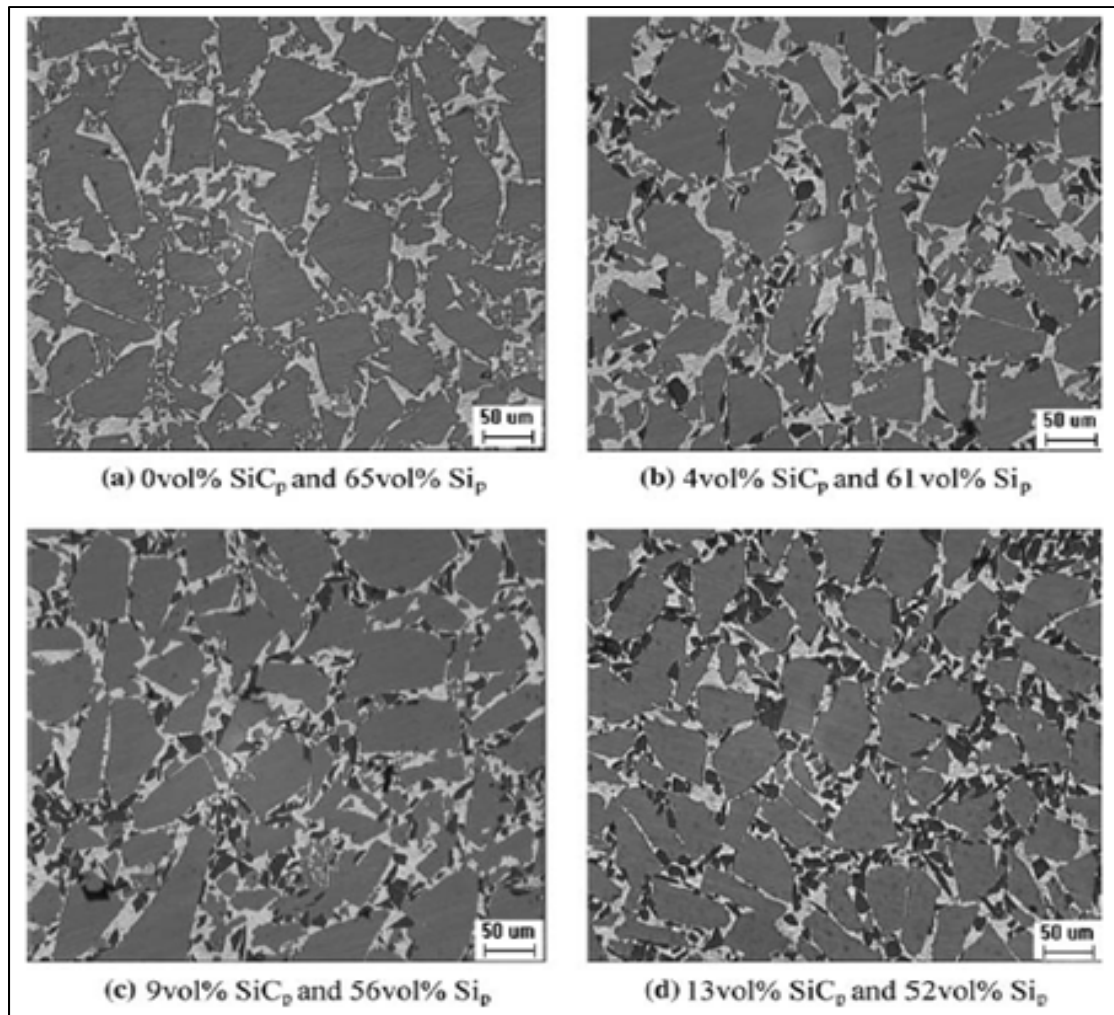


Figure 1-5 : Micrographie de Al/SiC<sub>p</sub> + SiC<sub>p</sub> avec différentes fractions volumiques tirées de (Zhang et al., 2007)

Dans le cadre de notre étude, nous aurons besoin d'une combinaison de paramètres de coupe pour réaliser nos essais en nous appuyant sur la littérature. Les paramètres de coupe présentés au tableau 1.1 sont ceux utilisés pour une matrice d'aluminium avec 65 % de renfort volumique.

Tableau 1-1 : Paramètres de coupe pour une matrice d'aluminium (Zhang et al., 2007)

Paramètres	Valeurs
Vitesse de fraisage (m/mm)	25
Vitesse de rotation (tr/min)	2000
Avance par dent (mm/z)	0,015
Avance (mm/min)	60
Profondeur de passe (mm)	0,5
Outil de fraisage	YG6

La figure 1.6 illustre la microstructure de l'alliage Al/SiCp + SiCp pour différentes fractions volumiques de SiCp et Sip. L'expérience a montré que lorsque 13 % des particules de silicium sont remplacé par la même fraction volumique et la même taille de particules de SiCp, la résistance à la flexion s'améliore de 20.1 % tandis que et la dureté à l'échelle de Vickers et brinell s'améliorent de 23.1%. Comme l'illustrent les figures 1.6 et 1.7.

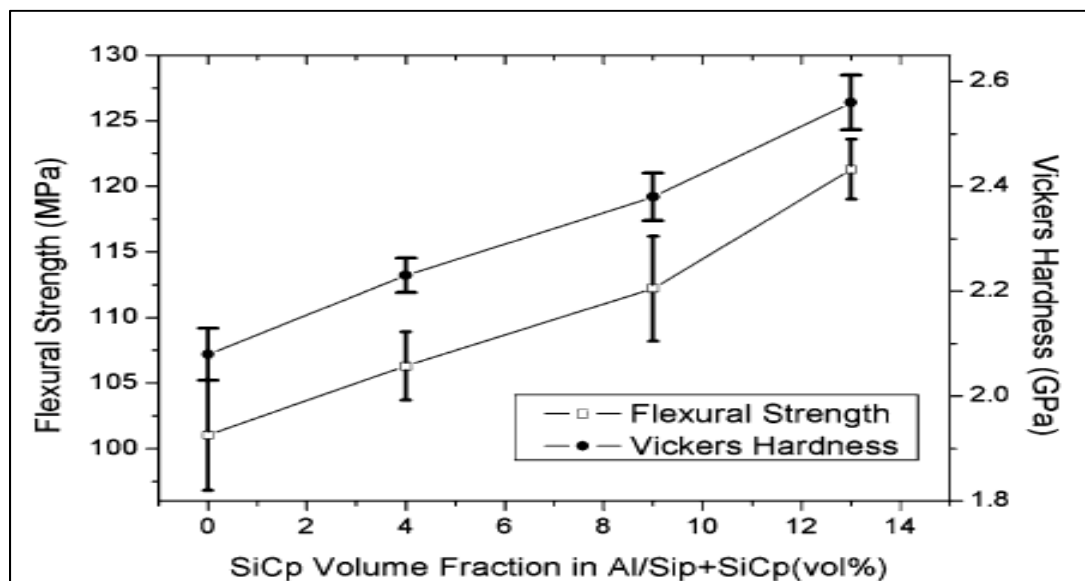


Figure 1-6 : La résistance à la flexion moyenne et la dureté Vickers par rapport à la fraction volumique SICP tirée de (Zhang et al., 2007)

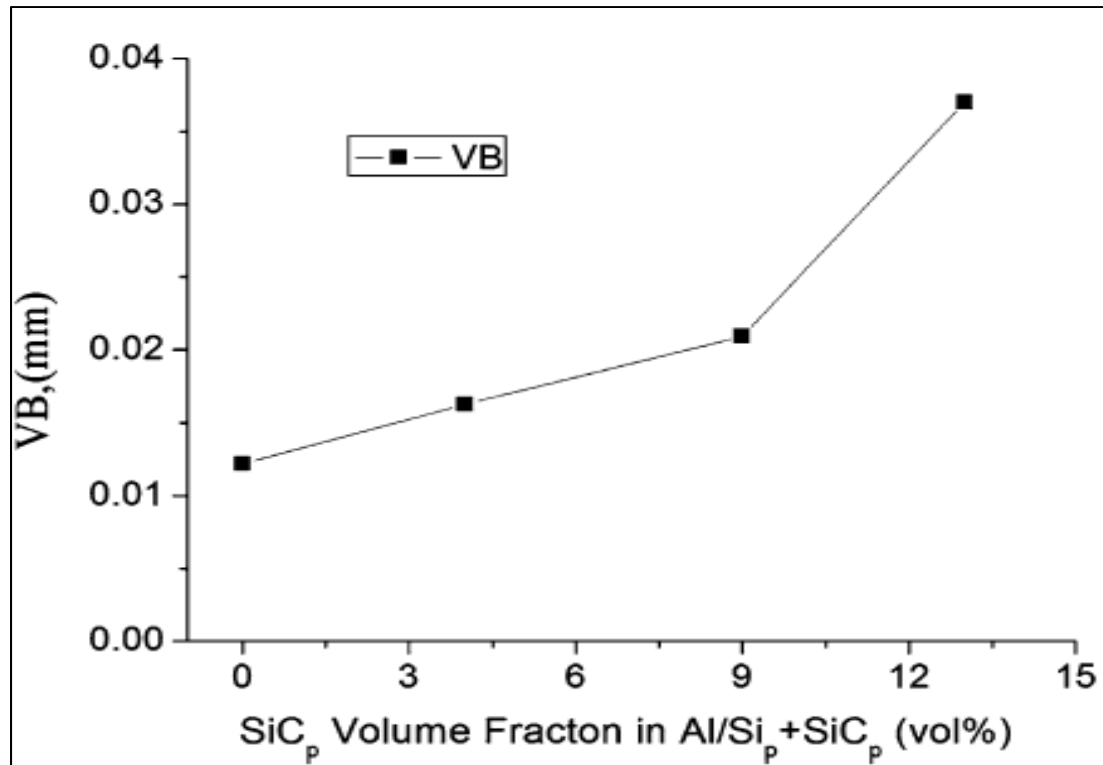


Figure 1-7 : Effet de la fraction volumique de SICP sur la dureté de VB  
tiré de (Zhang et al., 2007)

#### 1.4.1.5 Influence des paramètres de coupe sur l'état de surface

Dans la majorité des cas, le fini de surface usiné présente des irrégularités, des défauts et des différences par rapport à une surface idéale. Tout cela provient de la propriété du matériau, des conditions de coupe et des outils de coupe utilisés ainsi que de leurs géométries. Les défauts micro structuraux et géométriques peuvent générer des problèmes de vibrations machine/pièce, des problèmes de fatigue, d'amortissement, de durée de vie, d'assemblage, de traitement thermique, de qualité et de fonctionnalité. Ces défauts sont classés dans les trois catégories ci-dessous :

- **Écarts de forme et de position** provient sous l'effet du procédé d'usinage tel que la déformation géométrique de la pièce, ou à des défauts au niveau de la machine d'usinage et de leurs paramètres ou encore des défauts du matériau par génération des contraintes internes.

- **Des vibrations de machines** sous l'effet des problèmes liés aux pièces ou des outils ou encore causées par le mauvais choix des deux.
- **Les Sillons, stries et arrachements de matière** dus aux paramètres de coupe. En effet, la qualité de surface est définie généralement par les défauts de ce troisième groupe. Son origine est principalement liée aux paramètres et conditions de coupe telles que la profondeur de coupe axiale et radiale, l'avance par dent, la vitesse de coupe, la géométrie de l'outil, à l'hétérogénéité et l'homogénéité du matériau et ses propriétés chimiques et mécaniques. Les vibrations de l'outil ou de la pièce et le mode de lubrification peuvent évidemment avoir une influence sur l'état de surface.

Les travaux de Ramanujam, Muthukrishnan et Raju (2011) présentent l'étude expérimentale détaillée sur l'usinage de l'aluminium en carbure de silicium particulaire composite à matrice métallique (Al-SiC -MMC) en utilisant un outil en diamant. Des expériences ont été menées pour étudier les caractéristiques du matériau. L'objectif était d'établir une corrélation entre la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et la puissance de coupe, l'usure des outils et le fini de surface.

Le tableau 1.2 présente la composition chimique d'Al-SiC-MMC tandis que le tableau 1.3 présente ses propriétés mécaniques. Les paramètres d'usinage ainsi que leurs niveaux respectifs sont présentés au tableau 1.4.

Tableau 1-2 : La composition chimique d'Al-SiC –MMC  
(Ramanujam, Muthukrishnan et Raju, 2011)

Type of MMC	Reinforce-ment	%SiC	%Si	%Mg	%Fe	%Cu	%Mn	%Zn	%Ti	%Al
Particulate MMC	SiC -54 $\mu\text{m}$	10.00	7.77	0.63	0.15	0.16	0.09	0.08	0.10	Balance

Tableau 1-3 : Propriétés physiques et mécaniques d'Al-SiC –MMC  
(Ramanujam, Muthukrishnan et Raju, 2011)

Material	Density (gms/cm <sup>3</sup> )	Tensile Strength (Mpa)	Hardness (BHN)	Modulus of Elasticity (Gpa)	%of Elongation
A 356 10 SiC <sub>p</sub>	2.65	280	100	90	1.3 – 1.9

Les effets de toutes les expériences réalisées et qui vont nous servir dans notre travail sont présentés dans le tableau 1.4 suivant.

Tableau 1-4 : Paramètres d'usinage et de leurs niveaux respectifs  
(Ramanujam, Muthukrishnan et Raju, 2011)

Symbol	Machining parameter	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
A	Cutting Speed	m/min	75	120	180
B	Feed	mm/rev	0.1	0.2	0.3
C	Depth of cut	mm	0.3	0.6	0.9

Tableau 1-5 : Résultats de la performance d'usinage à l'aide de paramètres initiaux (Ramanujam, Muthukrishnan et Raju, 2011)

	Initial machining parameters	Optimal machining parameters	
		Prediction	Experiment
Setting Level	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>
Surface roughness (Ra)	5.22		3.06
Specific power (Sp)	10.93		3.75
Grey relational grade	0.4811	0.7451	0.8235
Improvement in grey relational grade = 0.3424			

Dans le tableau 1.5, les paramètres d'usinage sont tels que A<sub>1</sub>=75 m/min, B<sub>1</sub>=0.1 mm/rev et C<sub>1</sub>=0.3 mm pour les paramètres machine initiaux tandis que A<sub>3</sub>= 0.6401 m/min, B<sub>2</sub>=0.6123 mm/rev et C<sub>3</sub>=0.6563 mm pour les paramètres machine optimaux.

### 1.4.2 Application des outils de coupe diamantés

Le comportement et les propriétés des diamants artificiels sont plus complexes que ce qui est généralement reconnu. Ils ont une influence importante sur la performance des diamants monocristallins utilisés dans des opérations d'usinage de précision et sur la pièce aussi. Le travail de Wilks (1980) traite plusieurs facteurs tels que l'orientation cristallographique, les interactions de surface entre la pièce et l'outil, la fracture, l'écaillage et la fatigue en utilisant des outils avec le revêtement de diamant. Les histogrammes de la figure 1.8 résument les performances de quatre outils de fraisage de haute qualité similaires qui ont été utilisés plusieurs fois.

Les résultats indiquent le nombre de composants satisfaisants usinés par chaque outil pour le même nombre total de pièces. Les outils A et D étaient bien supérieur à B et C. Cependant, les deux outils A et D ont donné des performances variables, et parfois même C a donné une bonne performance. Une inspection des outils, la finition et les conditions d'usinage montrent que les outils A et D avaient une cristallographie assez similaire et différente de celle des deux autres outils.

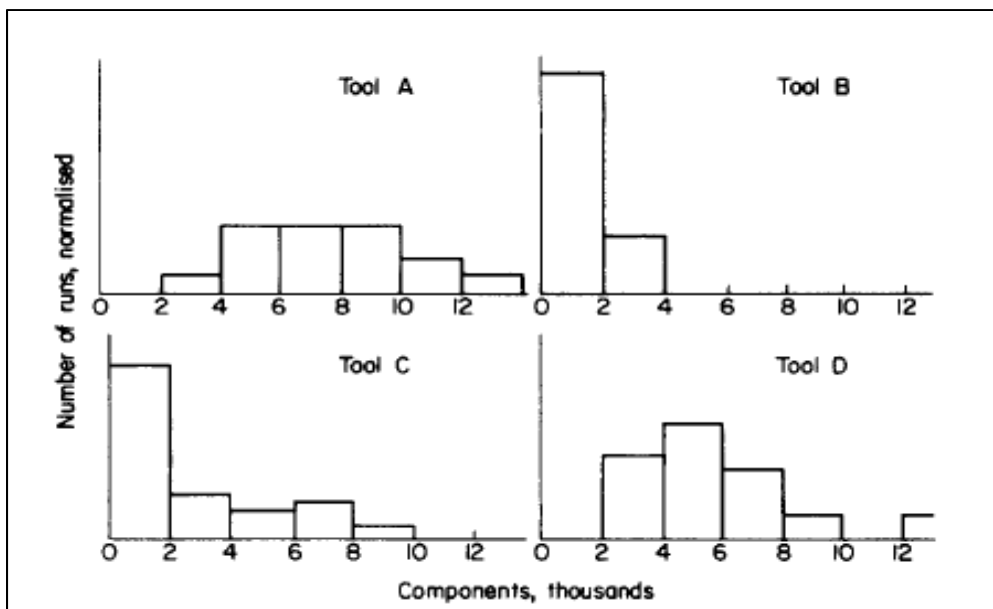


Figure 1-8 : Histogrammes montrant les performances de quatre outils de fraisage similaires de haute qualité tirée de (Wilks, 1980)



Afin d'augmenter la durée de vie de l'outil lors de l'usinage des alliages abrasifs tel que l'MS43, il est toujours recommandé de revêtir cet outil, car sa longévité est directement liée au revêtement appliqué.

Dans leurs travaux, Kanda et al. (1995) ont étudié l'augmentation du rayon des arêtes tranchantes ou de coupe au niveau d'outil sous l'effet du revêtement, ils ont relevé les problèmes suivants :

- Une augmentation de la force de coupe.
- La surface du film de diamant devient rugueuse, ce qui entraîne une augmentation de la rugosité du fini de surface de la pièce qui provoque à son tour une diminution de la capacité d'évacuation des copeaux diminue. Il en découle de cela, une augmentation du couple de serrage des outils de coupe.
- La résistance à une dégradation de revêtement de diamant et la diminution de la résistance à la rupture transversale.

Tel que l'illustre la figure 1.9, l'usure des flancs de l'outil non revêtu ont été usés d'environ 300  $\mu\text{m}$  après une longueur totale de coupe de 200 m, tandis que celui de l'outil revêtu du diamant était inférieur à 150  $\mu\text{m}$  d'usure après une longueur de coupe de 1500m.

À partir de ce résultat, il est possible d'affirmer que l'outil revêtu en diamant a une durée de vie 10 fois plus longue que celle de l'outil non revêtu pour la transformation de l'Al-Si.

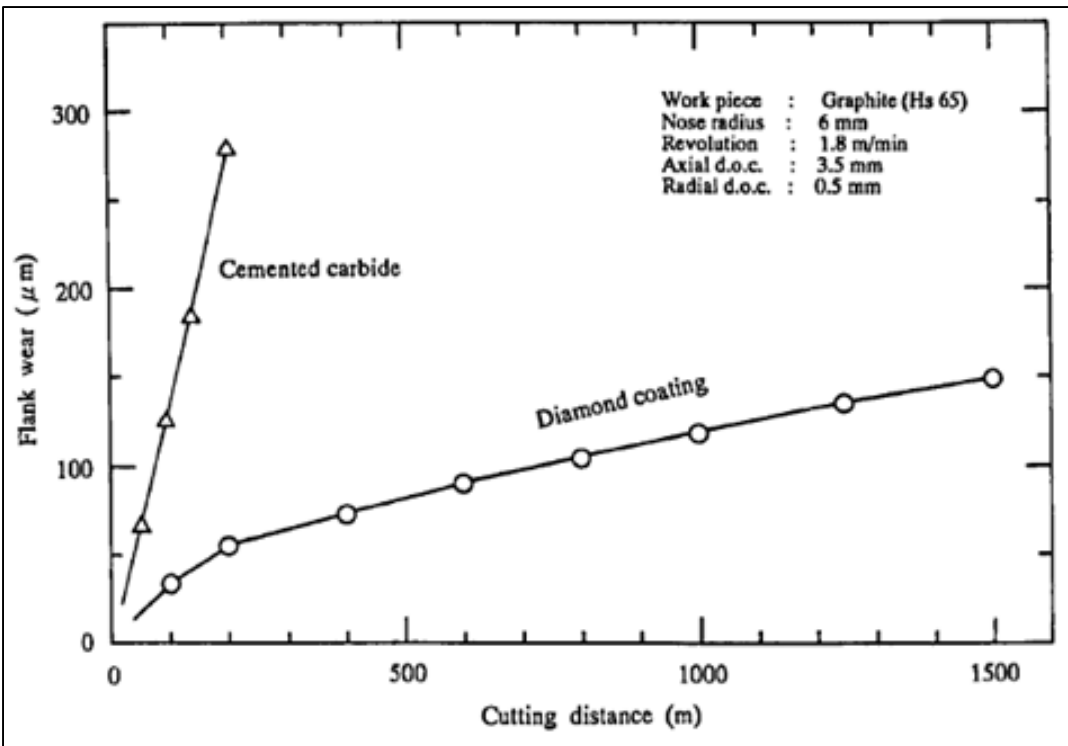


Figure 1-9 : Caractéristique de deux outils de fraisage sans et avec revêtement tiré de (Kanda et al., 1995)

Nous pouvons également observer à la figure 1.10 que la résistance à la rupture transversale de l'outil de carbure revêtu en diamant diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du film de revêtement. Cette diminution de la résistance à la rupture transversale avec l'augmentation de l'épaisseur du film a été bien expliquée par l'hypothèse d'une concentration de contraintes à la pointe d'une fissure avec une profondeur égale à l'épaisseur du film.

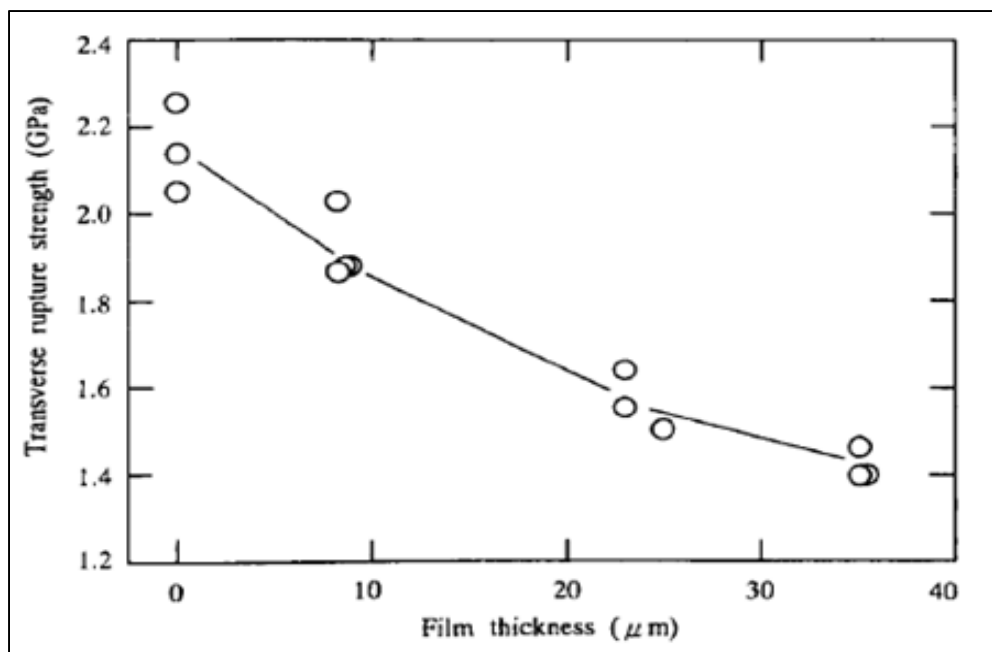


Figure 1-10 : Relation entre la résistance à la rupture transversale et l'épaisseur du film de diamant tiré de (Kanda et al., 1995)

### 1.4.3 Le perçage dans l'aluminium Silicium

L'étude du perçage et l'alésage de l'alliage coulé d'aluminium-silicium (SAE 322 6 % Si) ont été effectués par Bezerra et al. (2001). Leurs travaux ont permis d'évaluer la stabilité dimensionnelle (diamètre, circularité et cylindricité) et la rugosité de la surface des trous cylindriques alésés en utilisant des forets (pour percer) et des alésoirs (pour aléser) en carbure cémenté. Les essais ont été faits pour différentes conditions de coupe afin d'optimiser le processus.

Les paramètres suivants ont été variés individuellement : la profondeur de coupe, la vitesse d'avance, la vitesse de coupe, l'angle d'hélice, le nombre de lames ou d'arête de coupe. Pour toutes ces expériences, la consommation d'énergie durant l'opération d'alésage a également été enregistrée. Les résultats des expériences montrent que la qualité satisfaisante des trous peut être réalisée lors de l'alésage en utilisant de plus petites profondeurs de coupe, des vitesses de coupe plus faibles, des vitesses de rotation plus élevées ainsi que des alésoirs droite flûte avec de nombreuses lames et de petites marges. Cependant, aléser avec ces conditions de coupe

recommandées améliore la précision des trous réalisés et en même temps augmente la consommation d'énergie et détruit l'état de surface générée. De plus, les auteurs ont remarqué que l'utilisation d'un alésoir avec beaucoup de lames peut améliorer la précision, la finition de surface et la rondeur des trous réalisés par contre ils ont obtenu une mauvaise cylindricité et une plus grande consommation d'énergie lors de l'usinage.

Les résultats de cette étude montrent que pour aléser un trou dans un alliage aluminium-silicium avec un alésoir en carbure et avoir les meilleurs résultats en termes de précision géométrique, de finition de surface et la cylindricité des trous produits, la profondeur de coupe doit être inférieure à 0,2 et 0,3 mm. Aussi, pour assurer la meilleure stabilité dimensionnelle, la finition de surface, ainsi qu'une quantité d'énergie consommée minimale, il est nécessaire d'utiliser une vitesse de coupe inférieure à 25 m/min.

La précision du diamètre de trou peut généralement être améliorée en augmentant la vitesse d'avance lors de l'alésage entre 0,20 et 0,40 mm/rev. Pour l'angle d'hélice s'il est compris entre  $0^\circ$  et  $7^\circ$  les trous vont être avec les meilleures valeurs de circularité et cylindricité, associées à une faible consommation d'énergie. Cependant si l'angle d'hélice est  $0^\circ$ , la finition de surface va être plus faible, bien que le diamètre du trou soit beaucoup plus précis. L'alésoir avec plusieurs lames produit une meilleure précision de diamètre du trou et la finition de surface. L'usinage avec alésoirs à petite marge (0,20 mm) a donné d'excellents résultats du point de vue de précision du diamètre du trou, la rugosité de surface ( $0.05 \mu\text{m}$ ) et la cylindricité.

Le perçage d'un alliage d'aluminium contenant 6 % de Silicium lubrifié à l'eau pulvérisé (H<sub>2</sub>O-MQL) nécessite un couple et une force de poussée inférieurs au perçage à sec. Même les essais avec les outils non revêtus et revêtus ont montré qu'il n'y a pas une différence remarquable au niveau du couple et la force de poussée nécessaire dans le cas du perçage lubrifié à l'eau pulvérisée (H<sub>2</sub>O-MQL) telle que le montre la figure 1.11.

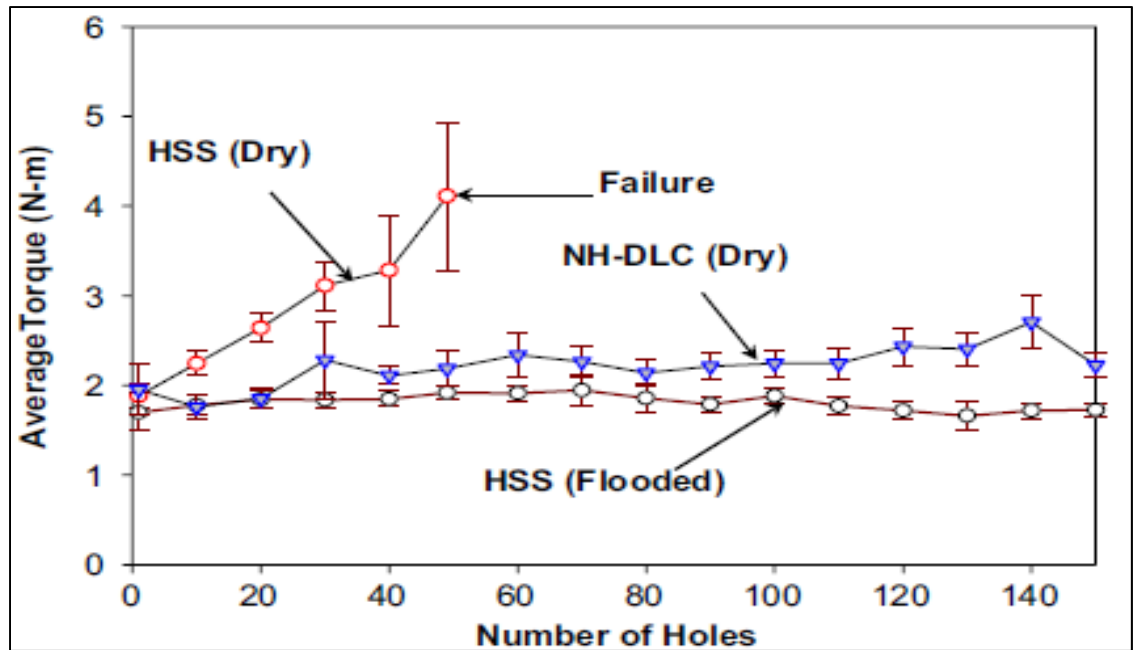


Figure 1-11 : Comparaison des réponses de couple de perceuses HSS (à sec et inondé) avec les exercices DLC revêtus à l'état sec tiré de (Bhowmick et Alpas, 2008)

La figure.1.11 effectuée par Bhowmick et Alpas (2008) montre les données réduites sur différents outils de perçage et les couples utilisés en fonction du nombre de trous. Les barres d'erreur indiquent l'écart type des paramètres de coupe pour chaque trou.

### 1.5 Méthodologie de la recherche

Après avoir effectué une revue de littérature sur notre sujet, réalisé des expériences et échangé avec des chercheurs universitaires, nous pouvons à présent définir la méthodologie de notre recherche. Nous avons collecté des abaques sur le choix des outils et les paramètres de coupe et leurs impacts sur l'obtention des pièces conformes. Par contre, nous n'avons pas trouvé suffisamment d'informations quant à l'effet de chacun des paramètres de coupe sur la variation et les défauts de la microstructurale ainsi que leur hiérarchisation pour le métal étudié ou sur la présence éventuelle des phénomènes d'interactions entre les facteurs. La perception initiale du processus a donc l'allure d'une boîte noire dans laquelle il est impossible de prévoir exactement les réponses sur le produit fini. Il existe un nombre important de facteurs influents. Partant de ce constat, il est recommandé de réaliser des expériences pour augmenter le capital

d'informations, l'ensemble constituant le plan d'expériences. Les essais prévus doivent permettre de répondre aux questions posées. Il s'agit de déterminer les facteurs à tester, de connaître leurs effets et leurs interactions, pour pouvoir régler les paramètres afin d'obtenir la qualité souhaitée.

#### ❖ La synthèse des connaissances

Les opérations d'usinage en finition nécessitent une bonne expérience et les bons paramètres si l'on désire obtenir des pièces de bonne qualité. La représentation des causes principales agissant sur l'efficacité du produit présentée sur le diagramme de la figure 1.12.

Pour déterminer la réponse du phénomène étudié, il faut effectuer des mesures de l'état de surface, contrôler les efforts de coupes, les défauts sur la surface, les contraintes résiduelles, les fissures et les défauts et la microstructure.

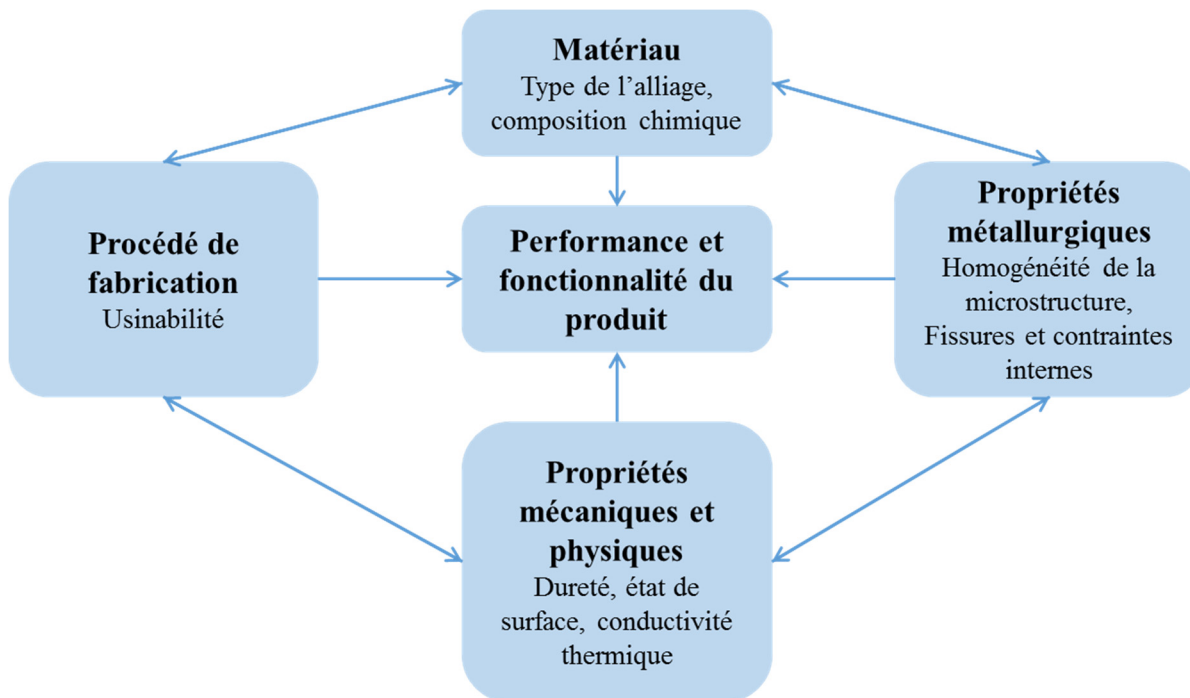


Figure 1-12 : Diagramme de performance et de fonctionnalité du produit

#### ❖ Méthodologie du plan d'expérience

La méthodologie du plan d'expériences est une technique souvent utilisée pour planifier les expériences et s'assurer que les données pertinentes soient bien collectées et que l'analyse statistique qui en découle soit valide. En faisant varier simultanément toutes les variables expérimentales, l'incidence de facteurs inconnus est presque éliminée. Tout au long des étapes du plan, les chercheurs doivent utiliser les méthodes mathématiques, mais pas uniquement à la fin de l'étude au moment d'analyser les résultats finaux de l'expérience.

La méthodologie du plan d'expérience répond aux préoccupations importantes telles que : « le nombre optimal de tests à effectuer ? La meilleure méthode d'analyse et d'évaluation des données de l'expérience ? » À cet effet, la sélection du modèle mathématique impose une formulation claire et une bonne compréhension de l'objectif de l'expérience.

Cette étude est caractérisée par d'importants retombés, mais deux paramètres principaux seront choisis pour les contrôler et à analyser.

Pour satisfaire certaines conditions, ces paramètres doivent être :

- Biens définis afin d'aboutir à l'objectif de l'étude ;
- Faciles à quantifier, à mesurer et à interpréter ;
- Évaluer facilement à partir des paramètres choisis.

Les facteurs du plan d'expérience sont les variables d'entrée et il est important de prendre en compte tous ces facteurs. Donc un expérimentaliste cherche toujours à utiliser tous les facteurs possibles et pertinents qui peuvent contribuer sur la variation des résultats en se basant sur la littérature. Plusieurs façons pour traiter ce problème :

La première dépend de l'équipe de chercheurs qui sélectionnes les facteurs à utiliser.

La deuxième dépend du plan d'expérience lui-même qui peut optimiser le nombre des essais en considérant l'interaction des facteurs du deuxième ordre et plus. Concernant les facteurs, ils peuvent être qualitatifs ou quantitatifs, mais les deux doivent être contrôlables évidemment. Le processus de l'étude dépend d'une façon directe des choix de ces facteurs et il ne doit pas qu'ils soient en fonction des autres facteurs. Il faut que la combinaison des facteurs soit compatible pour que toutes les combinaisons des facteurs soient réalisables.

## 1.6 Conclusion

Après avoir situé le contexte et la problématique de notre sujet de recherche qui s'attaque au problème de fabrication et de la topographie de surface lors de la mise en forme des alliages d'aluminium silicium. Nous avons effectué une revue de la littérature concernant le problème posé. Cela nous a permis de constater que les causes de l'usure de l'outil sont nombreuses. Les principales causes sont l'effet abrasif des particules dures de silicium les paramètres de coupe, la déformation plastique de l'arête de coupe de l'outil, la composition chimique du matériau de l'outil de coupe, la diffusion entre les bavures du matériau de la pièce et de l'outil ainsi que le soudage entre la pièce et l'outil sous l'effet de la chaleur dans la zone de coupe. Après avoir fixé les objectifs, nous avons élucidé la méthodologie de notre travail.

Compte tenu de la complexité de l'analyse pour déterminer et optimiser la relation entre les variables indépendantes et le rendement, certains chercheurs ont utilisé la méthode des plans d'expériences pour contrôler les problèmes de contact outil matière, de fini de surface et de l'usure de l'outil. Cette méthode permet de contrôler plus efficacement les variables qui influencent la performance avec un minimum d'expériences. La plupart des chercheurs se sont intéressés à travailler seulement à la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de passe axiale et radiale alors que d'autres se sont intéressés à la durée de vie de l'outil et leurs problèmes pour établir leurs modèles,

Nous nous proposons dans les prochains chapitres d'étudier l'intégrité de surface qui englobe la rugosité, et les défauts microstructuraux, la vibration de la pièce, les efforts de coupe et de déterminer les relations existantes entre elles ainsi que les conditions de coupe optimums.



## **CHAPITRE 2**

### **CHOIX ET CARACTÉRISATION DE L'ALLIAGE D'ALUMINIUM À HAUT POURCENTAGE DE SILICIUM**

#### **2.1 Introduction**

Certains alliages d'aluminium utilisés pour des applications particulières en aéronautique ne font pas l'objet de normalisation et réglementation comme celle des autres matériaux bien connu dans ce secteur d'industrie. Pour une de ces applications, deux matériaux différents par leur composition chimique et possédant chacun des propriétés mécaniques différentes sont disponibles sur le marché. Cependant, leurs différences sont jusqu'ici inconnues par les entreprises aéronautiques. Une identification, une caractérisation et une comparaison entre ces deux alliages d'aluminium à pourcentage de silicium différent et produits par refroidissement rapide ont été mandatées par la compagnie MDA Corporation. L'étude des échantillons et le protocole expérimental ont été élaborés dans les laboratoires de l'école, et autres dans les laboratoires des centres de recherches externes.

Dans ce chapitre, après l'identification du matériel, nous avons contrôlé et vérifié l'effet du procédé de mise en forme ou de fabrication sur les propriétés du matériau. Le processus d'identification des échantillons est divisé en cinq parties : des essais de traction, de dilatométrie, de conductivité électrique, de placage, de dureté et d'analyse de la microstructure. Nous allons ensuite comparer nos résultats avec des banques de données de la littérature afin de caractériser les matériaux étudiés.

#### **2.2 Choix de matériaux**

Les matériaux ciblés sont les alliages d'aluminium avec un haut pourcentage de silicium, un procédé de fabrication spécial et un traitement thermique très sévère, pour agir sur la microstructure de cet alliage et donc sur les caractéristiques mécaniques. La légèreté du

l'aluminium encourage à l'utiliser surtout dans les applications aérospatiales. De plus, le silicium est pour faire baisser le coefficient de dilatation thermique grâce à ces propriétés.

MDA comme société mère de ce projet a demandé une recherche détaillée et une comparaison de tous les alliages qui pourraient satisfaire son besoin, qui existe dans le marché international. Et avoir une idée sur les défis de mise en forme de ces types des alliages.

Alors l'idée été de chercher les fournisseurs ou les fabricants potentiels et analyser le procédé de fabrication d'alliage et on a réussi à trouver une diversité la dont :

- *Sandvik* : Produit des alliages qui sont fabriqués selon la conception ou la demande personnalisée, des produits avec coefficient d'expansion contrôlé (alliages CE), très légère, bonne rigidité. Solidification rapide avec formage.
- *RSP Technology development* : Produis et vends des alliages d'aluminium avec des propriétés haut de gamme. En utilisant un processus des vitesses de refroidissement ultrarapide.
- *Ceramic Process Systems, Ofallon casting MS43C Composites* : à base de carbure de silicium et une matrice en aluminium (*Aluminum Alloy 359*). Le composite est isotrope avec une dilatation thermique contrôlée, haute conductivité thermique, légère, haute résistance, haute rigidité. L'addition de la céramique.
- *PCC-Advanced Forming Technology*: à base de carbure de silicium et une matrice en aluminium (*Aluminum Alloy A356*). Le composite est isotrope avec une dilatation thermique contrôlée, haute conductivité thermique, légère, haute résistance, haute rigidité. Fabriquer sous une pression contrôlée.

Le tableau 2.1 ci-dessous rassemble tous les matériaux potentiels qui peuvent satisfaire notre besoin dans le cadre de ce projet. On se basant sur différentes caractéristiques, physiques, chimiques, électriques, ainsi que mécaniques, qui sont énoncées dans le tableau. Ce qui nous permet de sélectionner, avec « MDA », le matériau à utiliser pour procéder notre recherche et la fabrication des prototypes pour les tests chez « MDA » aussi.

Tableau 2-1 : Présentation des propriétés mécaniques de différents matériaux

Propriétés	% Si	Densité	CTE	Dureté	Machinabilité	Limite élastique	Module d'élasticité	Élongation	Résistance à la traction	Conductivité thermique
Unité	%	g/cm <sup>3</sup>	ppm/°C		%	MPa	GPa	%	MPa	
<b>6061-T6</b>	0,4 - 0,8 %	2,7	23,6 de 20 à 100 et 25,2 de 20 à 300°C	95 Brinell	50 %	276	68,9	17	310	167 W/m-K ou 0,00000399 ohm-cm Résistivité électrique
<b>Delta Alloy 4032-O</b>	11 - 13,5 %	2,68	18 de -50 à 20 et 21 de 20 à 300°C	120 Brinell	70 %	>=331	79	4	>=359	154 W/m-K ou 0,00000432 ohm-cm Résistivité électrique
<b>CE7 (Controlled Expansion Alloy)</b>	70%	2,4	7,4 de -60 à 200°C	255 Vickers 242 Brinell	-	100	125	-	100	100 W/m-K à 200°C et 120W/m-K à 25°C
<b>CE11 (Controlled Expansion Alloy)</b>	50%	2,5	9,2 de -173 à 27°C et 12,7 de 25 à 200°C	-	-	125	109	-	138	122 W/m-K à 200°C et 149W/m-K à 25°C
<b>RSP RSA-443</b>	40%	2,54	13,5	110 Brinell	-	150	102	1,5	240	135 W/m-K
<b>RSP RSA-463</b>	60%	2,47	9,7	230 Brinell	-	130	117	<1	200	125 W/m-K
<b>RSP RSA-431 T6</b>	30%	2,6	15,5	190 Brinell	-	375	95	1	435	120 W/m-K
<b>Al-SiC MMC (30% Silicon Carbide)</b>	30% Silicon Carbide	2,81	14,6 à 100 °C	41,9 Rockwell B = 86 Brinell	-	210	120	<1,0	216	165 W/m-K
<b>Al-SiC MMC (40% Silicon Carbide)</b>	40% Silicon Carbide	2,81	11,9 à 100 °C	-	-	199	147	<1,0	226	165 W/m-K
<b>Al-SiC MMC (68% Silicon Carbide)</b>	68% Silicon Carbide	3,03	7,5 de -50 à 150°C	97 Rockwell B = 228 Brinell	-	400	223	-	207	175 W/m-K
<b>Al SiC -9</b>	63% Silicon Carbide	3,01	8,75 de 30 à 200°C	88 Rockwell 190 Brinell	-	430	192	0,295	550	160 W/m-K
<b>Al SiC -10</b>	55 % Silicon Carbide	2,96	10,56 de 30 à 200°C	-	-	427	167	-	450	160 W/m-K
<b>Al SiC -8</b>	70 % Silicon Carbide	2,99	6,6 à 30 et 9 à 250°C	99 Rockwell B= 238 Brinell	-	-	217,5	-	250	180 W/m-K

Source des données techniques : (Matweb, 2017)

Après avoir sélectionné les alliages estimé potentiel nous sommes demandés de classer ces alliages selon les performances déjà discutées, nous avons adopté une stratégie de sélection. Cette stratégie consiste à donner un coefficient à chaque caractéristique selon son importance pour la fonctionnalité de la pièce, le cahier de charge et les exigences de MDA. En plus, classer les matériaux et leurs donner une note selon la valeur de chaque caractéristique comme il montre le tableau ci-dessous. Puis la multiplication des coefficients des caractéristiques et la note de chaque matériau nous permettent de sortir le meilleur matériau dans la liste au complet.

Tableau 2-2 : Comparaison et sélection du métal

Propriétés	% Si	Densité	CTE	Module d'élasticité	Résistance à la traction	Conductivité thermique	Note	Rang
Coefficient		1 ↓	5 ↓	4 ↑	2 ↑	3 ↑		
6061-T6	0,4 - 0,8 %	7	1	1	9	11	67	11
Delta Alloy 4032-O	11 - 13,5 %	8	2	2	10	6	64	13
CE7 (Controlled Expansion Alloy)	70%	13	7	8	1	1	85	8
CE11 (Controlled Expansion Alloy)	50%	11	6	5	2	3	74	10
RSP RSA-443	40%	10	5	4	7	5	80	9
RSP RSA-463	60%	12	11	6	3	4	109	6
RSP RSA-431 T6	30%	9	3	3	11	2	64	12
Al-SiC MMC (30% Silicon Carbide)	30% Silicon Carbide	6	4	7	5	10	94	7
Al-SiC MMC (40% Silicon Carbide)	40% Silicon Carbide	5	13	9	6	9	145	3
Al-SiC MMC (68% Silicon Carbide)	68% Silicon Carbide	1	8	13	4	12	137	5
Al SiC -9	63% Silicon Carbide	2	9	11	13	7	138	4

Tableau 2-3 : Comparaison et sélection du métal (Suite)

Propriétés	% Si	Densité	CTE	Module d'élasticité	Résistance à la traction	Conductivité thermique	Note	Rang
<b>Coefficient</b>		<b>1 ↓</b>	<b>5 ↓</b>	<b>4 ↑</b>	<b>2 ↑</b>	<b>3 ↑</b>		
<b>Al SiC -10</b>	55 % Silicon Carbide	4	12	10	12	8	152	<b>2</b>
<b>Al SiC -8</b>	70 % Silicon Carbide	3	10	12	8	13	156	<b>1</b>
<b>Formule de calcul : La somme de (l'importance métal * importance propriété)</b>								

Dans ce travail, les alliages d'aluminium étudiés ne sont pas identifiés avec quatre chiffres comme la désignation dans le « *Teal Sheets – International Alloy Designations and Chemicals* ». Les éléments d'addition affectent énormément les propriétés structurales et mécaniques et en même temps ils sont nécessaires à leur mise en forme. De plus n'y a pas assez d'ouvrage dans la littérature, il y a assez des recherches avancées sur ces alliages puisqu'ils sont presque désignés juste pour les applications aérospatiales.

Tableau 2-4 : Recommandations des paramètres de coupes selon la nuance du métal à couper «harvy tool»

Nuance ISO	Matériaux à usiner	Vitesse de coupe (m/min) en fraisage			
		Acier Rapide		Carbure	
	Avance f en mm/dent/tour	0,03 à 0,1	0,1 à 0,2	0,05 à 0,2	0,2 à 0,3
<b>K-N</b>	Alliages d'aluminium de faible dureté sans silicium (AW 2030 ...)	250	200	500	400
	Alliages d'aluminium dur sans silicium ou %Si moyen (AW2017, AW 6060 ...)	120	80	300	200
	Alliages d'aluminium à haute teneur en silicium > 12%	80	40	120	80

Même les fournisseurs des outils ne fournissent pas assez d'informations pour les outils qui peuvent bien servir au niveau de fabrication ou de mise en forme. Le tableau 2.3 ci-dessus représente les différents alliages selon leurs duretés ou bien leur usinabilité et propose des

paramètres de coupes pour ces alliages. On remarque bien ici que pour les alliages K-N (les alliages d'aluminiums) qui contient plus que 12 % de Silicium n'est pas traité et il n'y a pas assez d'information sur les paramètres de coupes et le choix d'outillage.

## **2.3 Étude des caractéristiques du matériau choisi**

La microstructure est responsable de plusieurs propriétés d'un matériau, et il est possible de l'observer visuellement. L'utilisation d'un microscope permet d'observer plusieurs caractéristiques, séparer les détails de l'image et examiner la structure d'un métal ou d'un alliage. En comparant ces aspects avec des banques de données micrographiques et entre eux, il est possible de retracer le matériau étudié. Bien sûr, une certaine interprétation doit être faite par l'observateur. D'une part, notre mandat est de déterminer la composition chimique, les paramètres métallurgiques et les défauts des alliages produits par un procédé de refroidissement rapide RSP et d'autre part, de valider les paramètres fournis par le fabricant du métal.

### **2.3.1 Composition chimique de l'alliage**

Pour déterminer le pourcentage d'aluminium dans notre alliage, nous avons commencé par mesurer la dureté et la comparer avec la littérature telle qu'illustrée à la figure 2.1. Nous avons trouvé 100HV comme dureté moyenne. Après avoir fait une comparaison avec le travail de Alshmri et al. (2014). Nous avons constaté que le pourcentage de silicium est presque 30 %.

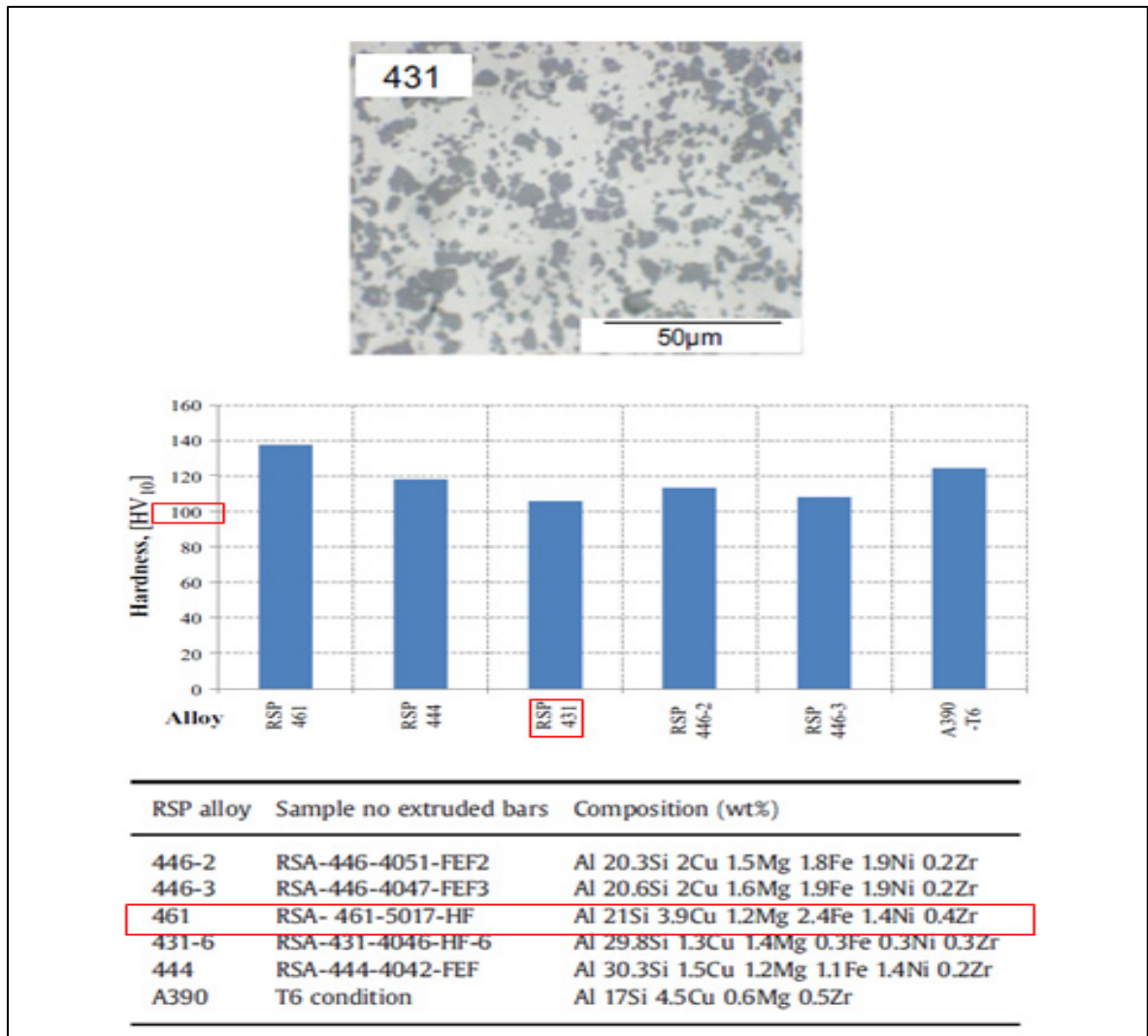


Figure 2-1 : Microstructure, dureté et composition du matériau RSP 413-6 F, tiré de Alshmri et al. (2014)

Afin de valider ce résultat nous avons calculé la fraction de silicium par le logiciel MIP4, dont nous avons pris des photos par le microscope confocal de trois zones différentes illustré à la figure 2.2, puis nous avons calculé la moyenne et comme cela nous a montrés que notre l'alliage MS43 contient 53 % de silicium et la balance c'est du l'aluminium comme nous pouvons le constater dans le tableau 2.4.

Tableau 2-5 : Fraction volumique de phase

	<b>Phase 1 Silicium</b>	<b>Phase 2 Aluminium</b>
<b>Mesure 1</b>	52,39	47,61
<b>Mesure 2</b>	51,5	48,5
<b>Mesure 3</b>	54,84	45,16
<b>Moyenne des mesures</b>	<b>52,91 <math>\pm</math> 1,67</b>	<b>47,09 <math>\pm</math> 1,66</b>

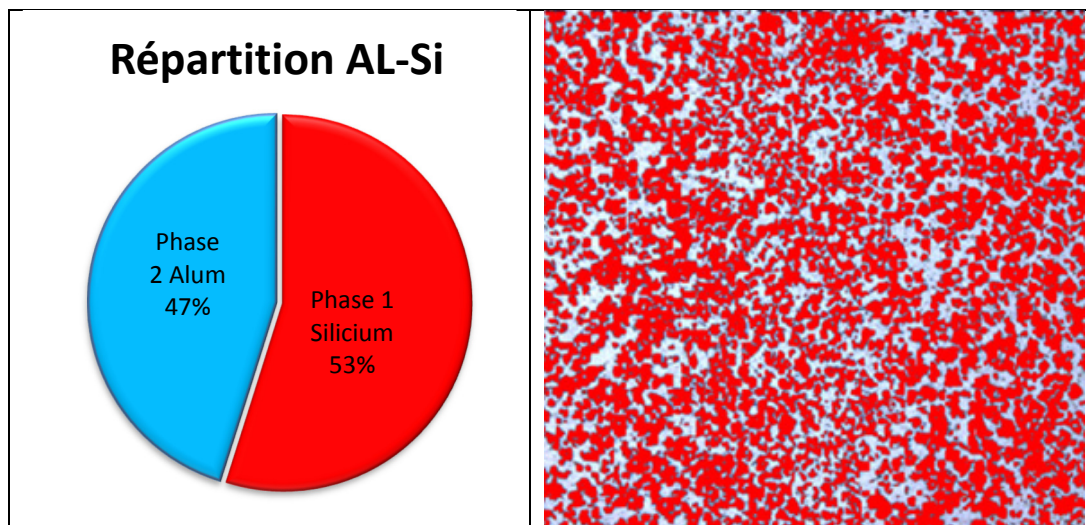


Figure 2-2 : Fraction volume des éléments d'alliage étudié MS43

Au cours de la réalisation des essais pour déterminer la fraction volume des éléments d'alliage, nous avons remarqué qu'il y a une possibilité d'avoir un troisième élément dans l'alliage, alors nous avons pensé d'appliquer un essai de diffraction du rayon X sur le MEB comme illustré en figure 2.3.



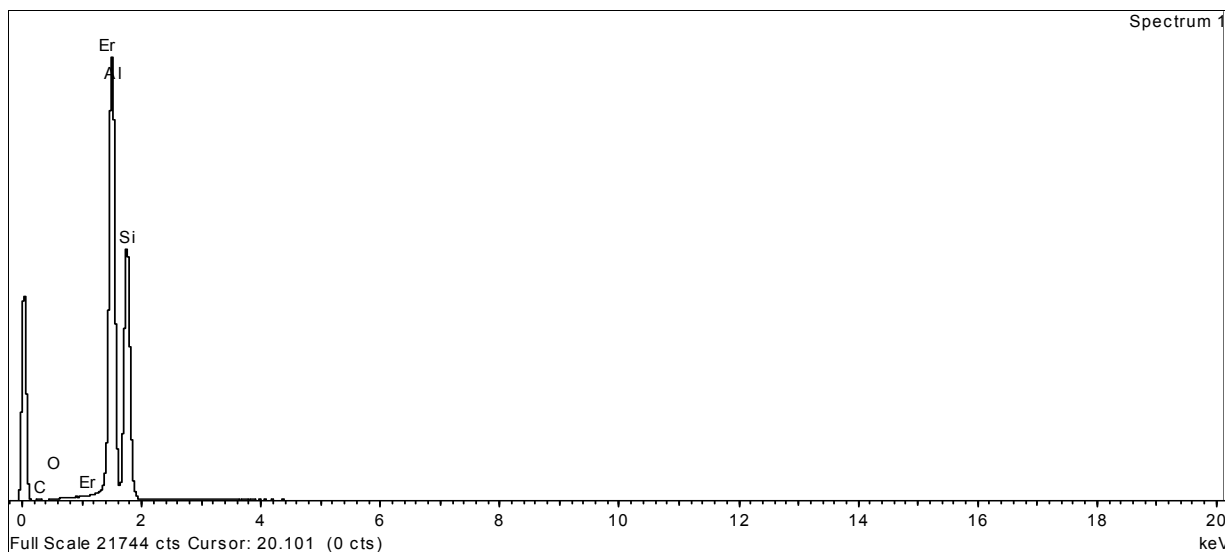


Figure 2-3 : Courbe de diffraction de rayon X

Le principe est de bombarder par un faisceau de rayon X le matériau. L'échantillon est fixé sur un dispositif mobile. Le détecteur de l'Energy Dispersive Using X-Ray (EDX) trie les photons remis par le matériau selon leur énergie et les résultats obtenus sont dans le tableau 2.5.

Tableau 2-6 : Pourcentage des éléments d'additions

Spectre	C	O	AL	Si	Er	Total
<b>Spectre (%)</b>	3,54	0,43	47,36	45,96	2,71	100,00
<b>Moyenne</b>	0,43	47,36	45,96	2,71	100,00	
<b>Max.</b>	0,43	47,36	45,96	2,71		
<b>Min.</b>	0,43	47,36	45,96	2,71		

### 2.3.2 Étude de la dureté

Un appareil de mesure de dureté Rockwell B a été utilisé pour évaluer la dureté de nos échantillons. Afin de donner un indice de dureté, le pénétrateur met une pression sur le matériau. Par la suite, un certain poids est appliqué par l'appareil. La distance de pénétration engendrée par ce poids donne alors l'indice de dureté Rockwell. Cet indice peut cependant faire partie de l'une des sept échelles (A, B, C, D, E, F et G) de mesure, ces échelles étant définies

par le type de pointeur, le poids appliqué par l'appareil ainsi que la nature de notre échantillon. Plusieurs méthodes permettent de tester la dureté d'un matériau, le test Rockwell quant à lui exprime la dureté à l'aide de la profondeur de pénétration en fonction de la charge appliquée, relation qui est ensuite convertie en une valeur de dureté sans unité.

Dans notre procédé, deux échantillons d'un grand lingot de notre matériau MS43 ont subi des mesures de dureté dispersée sur toute la surface pour analyser l'homogénéité de la dureté dans notre lingot. Pour l'échantillon découpé longitudinal de notre lingot figure 2.4, les propriétés mécaniques de dureté se modifient entre 51 et 57 HRB, mais d'une façon homogène sur toute la surface ce qui est normal sous l'effet de refroidissement rapide du métal. Cependant, les caractéristiques mécaniques de ceux-ci telles que la limite élastique, la résistance mécanique auront tendance à changer sous l'effet de refroidissement rapide, le procédé de fabrication et bien sur l'ajout de silicium.

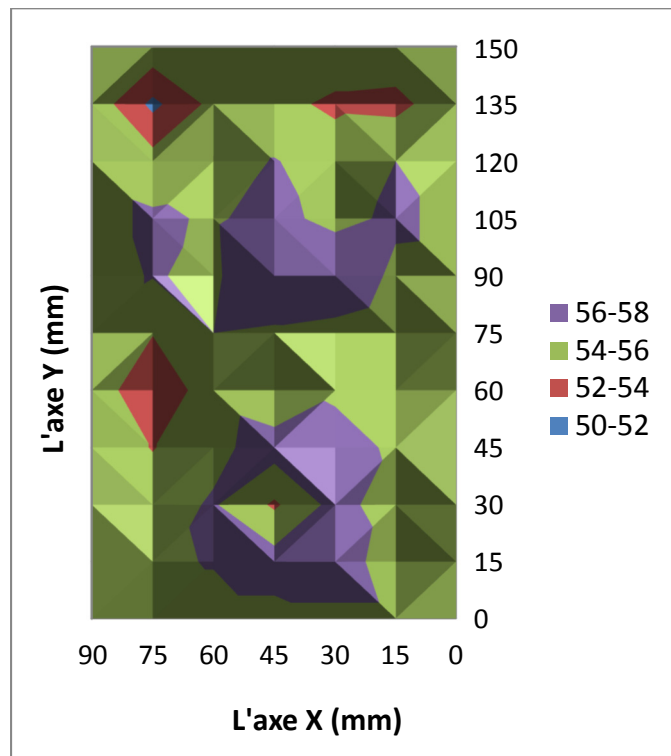


Figure 2-4 : Distribution de la dureté HRB sur l'échantillon MS43 découpé transversalement

Les variations des duretés dont nous avons obtenu en fonction de la dureté de revenu sont rapportées dans la figure 2.5, on a fait le même exercice sur un échantillon découpé transversalement de notre lingot et nous avons trouvé les mêmes résultats.

Dans notre cas, le silicium nous permettait d'augmenter la dureté de notre alliage afin d'atteindre celle voulue, soit  $54 \pm 4$  HRB comme moyenne sur la surface.

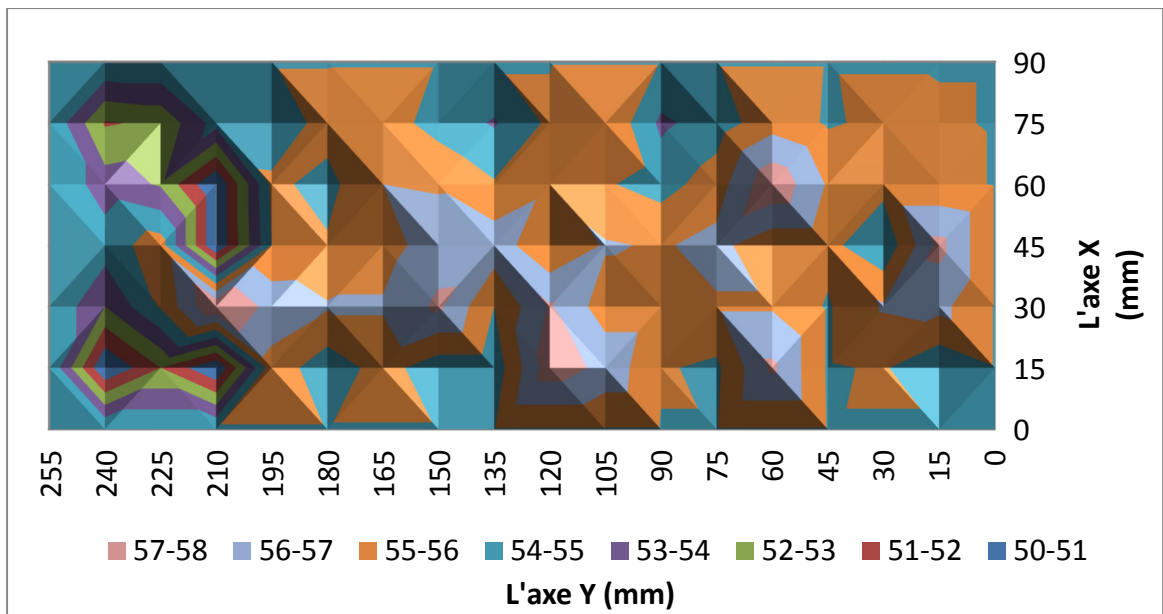


Figure 2-5 : Distribution de la dureté HRB sur l'échantillon MS43 découpé longitudinalement

D'après les deux figures, nous pouvons conclure que le procédé de fabrication par laminage combiné au refroidissement rapide fait augmenter davantage les propriétés mécaniques de notre alliage et en même temps, ne présente pas de problème de résistance ou une variation aigu au niveau de la dureté.

### 2.3.3 Comparaison d'usinabilité

L'usinabilité d'un matériau peut être définie comme la facilité avec laquelle il peut être usiné. Cela dépend des propriétés physiques et des conditions de coupe du matériau. Elle peut être exprimée en pourcentage ou en valeur normalisée, mais elle n'a pas de définition formelle. L'usinabilité d'un matériau se définit par le choix des paramètres de coupe et les mesures de

l'usure VB de l'outil ainsi que la rugosité de surface. Les trois critères dominants sont : les paramètres de coupe, la rugosité et l'usure de l'outil qui dépendants toutefois les uns des autres. À titre d'exemple, un alliage d'aluminium 6061-T6 est plus facile à usiner qu'un aluminium allié par du silicium. Les aluminiums faiblement alliés au silicium sont généralement considérés comme ayant une meilleure usinabilité que les autres alliages. Le concept de « bonne usinabilité » renvoie généralement à une action de coupe sans problèmes avec une longue durée de vie d'outil avec une rugosité correcte. Le plus souvent l'évaluation de l'usinabilité d'une matière donnée est faite à partir d'essais et les résultats sont exprimés par rapport à d'autres tests effectués sur d'autres matières dans des conditions comparables. Dans notre travail, nous avons sélectionné les paramètres recommandés par les fournisseurs d'outils et les caractéristiques d'outil récapitulés dans le tableau 2.6.

Tableau 2-7 : Caractéristiques d'outil, et paramètres de coupe recommandés par les fournisseurs Harvey

Outils	32415-C4
Diamètre de coupe (mm)	3,175
Rayon de coins (mm)	0,381
Longueur de coupe (mm)	12,7
Profondeur de passe radial (mm)	0,3175
Profondeur de passe axial (mm)	9,525
Vitesse de coupe (m/min)	137,16
Avance par dent (mm/dent)	0,02514

Après avoir effectué les tests et répété les essais deux fois pour valider les résultats obtenus, nous avons effectué une analyse détaillée pour les trois matériaux mis en question, les résultats obtenus sont présentés à la figure 2.6.

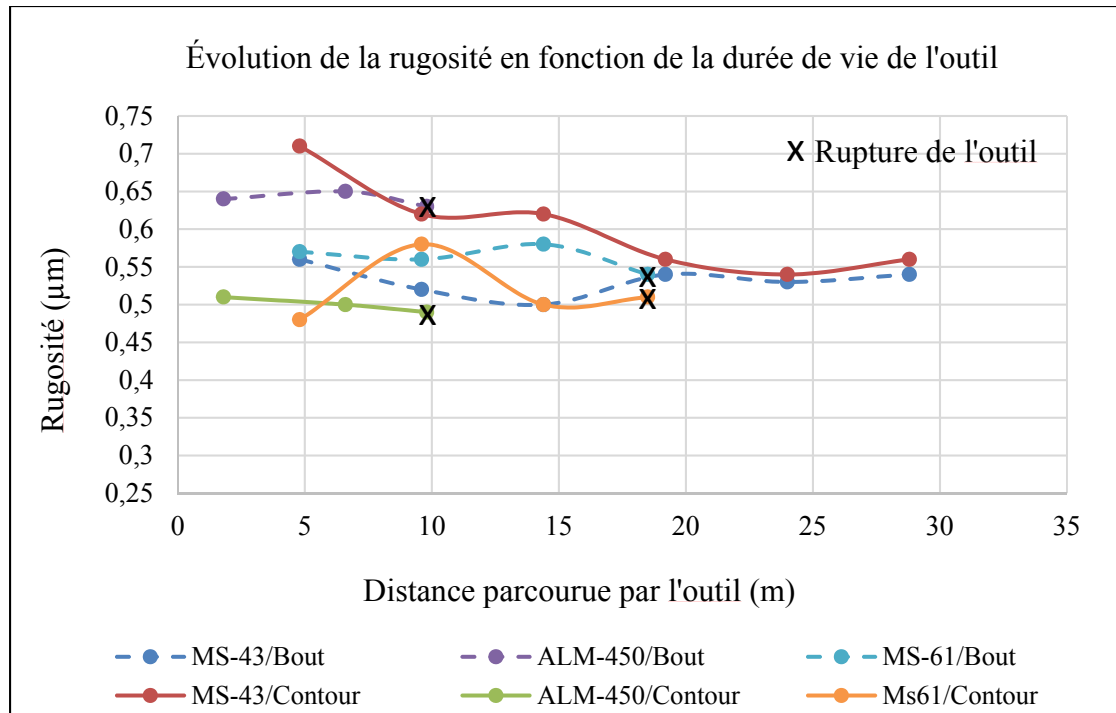


Figure 2-6 : Analyse de la rugosité des alliages d'aluminium silicium MS43, MS-61 et ALM-450

Nous avons analysé les effets de l'usinage, avec les paramètres recommandés sur la rugosité en fraisage en bout et en contournage, des alliages d'aluminium silicium MS43 (53%Si), MS-61 (60%Si) et ALM-450 (50%Si). Une étude comparative a conduit à la conclusion que, l'usinabilité de l'alliage MS43 est meilleure respectivement à celle de l'alliage MS-61 et ALM-450. La figure 2.6 montre des résultats semblables au niveau de la rugosité de surface pour le MS43 en bout et en contournage pour un parcours de 29 m de distance de coupe effectuée par l'outil. Par contre, pour les deux autres matériaux, les outils sont brisés après un maximum de 18.5 m. La figure 2.7 montre l'usure sur la face de coupe de l'outil en contact avec l'alliage MS43. Les rainures représentent l'effet des grains de silicium sur l'outil.

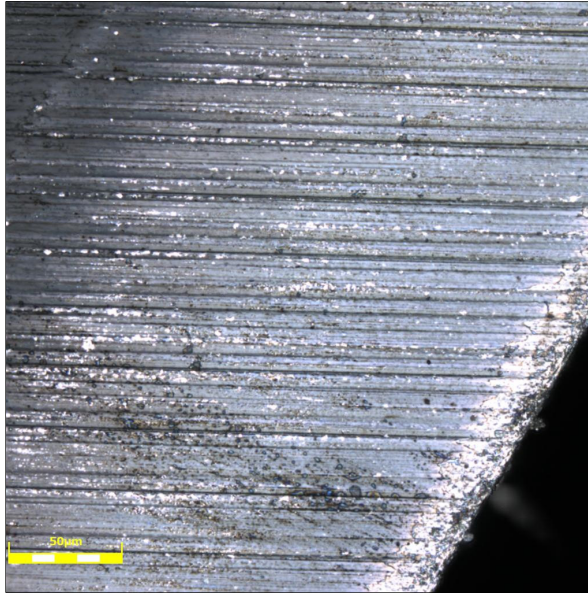


Figure 2-7 : Image d'outil utilisé sur l'alliage MS43, montrant l'usure sur l'arrête de coupe

#### 2.3.4 Analyse de traction

Dans les travaux de Arsenault (1984), ils ont utilisé le matériau 6061-T6 avec 20 % de SiC (SiC est le carbure de silicium est-il est plus abrasif et dur que le silicium) sous forme des plaques pour appliquer les essais de traction. Puis ils ont appliqué un traitement thermique T6 et T6 modifié (le temps d'échauffement est 3 fois plus grand que le traitement T6 standard) avec un laminage à chaud qui a été effectué à 573 K dans une série de passes. La réduction initiale de l'épaisseur par laminage avait pour objectif de réduire les fissures internes du matériau et pour avoir la forme finale des échantillons, ils ont également appliqué quelques phases de fraisage.

Les extrêmes de la courbe de ductilité et de résistance sont présentés à la figure 2.8. Les résultats de composite MS43C montrent qu'il est le moins ductile, mais la résistance la plus faible par contre, le même composite traité par le traitement T6 standard avait la résistance la plus élevée, mais la ductilité la plus faible. Ces résultats montrent que le traitement thermique T6 de l'alliage travaillé 6061 entraîne une augmentation de la résistance à la traction et à la rupture.

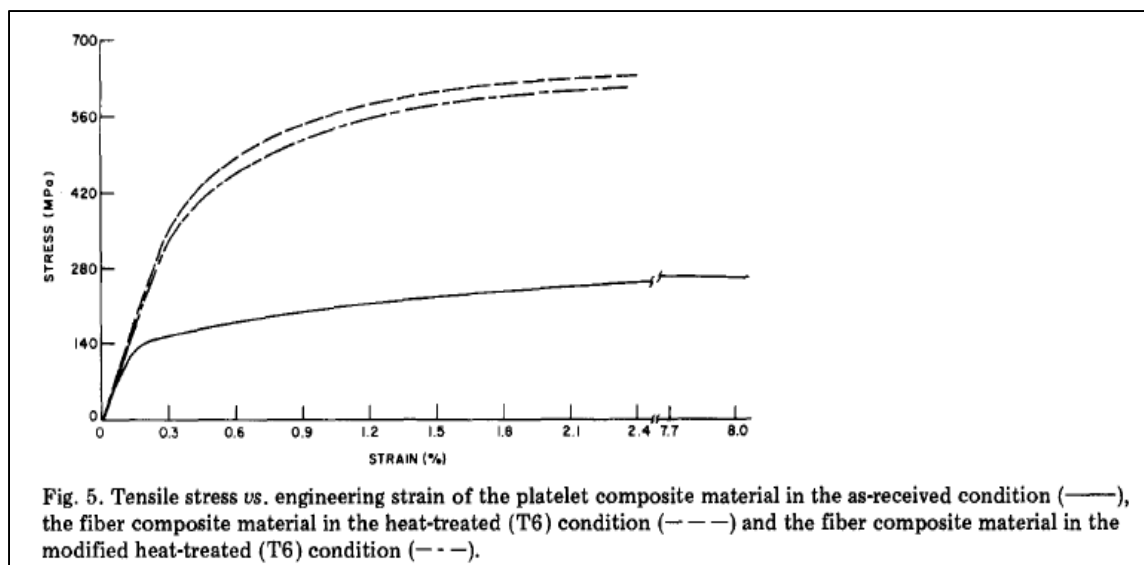


Figure 2-8 : Courbe d'allongement en fonction de l'allongement

Dans notre cas, en raison de la possibilité de déchirer ou d'éliminer le Si de la matrice d'aluminium à la suite du polissage, nous avons procédé en plusieurs étapes. Tout d'abord, l'échantillon a été coupé par usinage par étincelage (EDM). De plus, la morphologie du matériau a été obtenue en utilisant des échantillons métallographiques préparés et un microscope électronique à balayage. Cependant, nous n'arrivions pas à identifier la direction longitudinale et transversale puisque notre matériau contient le silicium sous forme presque sphérique homogène, ce qui fait une homogénéité dans tout le volume du matériau. Toutefois, l'orientation de la surface de l'échantillon a été prise en considération, alors nous avons pensé de vérifier ces résultats vus par l'analyse au microscope en appliquant une petite variation angulaire entre l'axe longitudinal et l'axe d'application de la force de traction. Mais en analysant les courbes, nous observons clairement que les deux courbes sont confondues ce qui montre qu'il n'y a pas une différence entre la direction d'application de la charge. Les poches denses de silicium dans les échantillons ont également été prises en considération et nous avons appliqué une analyse de la microstructure au bord de la surface de rupture.

En prenant la moyenne des mesures de trois essais, nous avons pu obtenir la courbe de la figure 2.9. La variation des données collectées est représentée dans le tableau 2.7. À partir des données recueillies, lors des essais de traction pour notre alliage d'aluminium avec 53 % de silicium nous avons déterminé les caractéristiques suivantes : limite conventionnelle

d'élasticité, limite ultime, module d'élasticité, allongement à la rupture et l'énergie de déformation. Nous observons clairement que notre courbe a la forme standard d'un matériau dur.

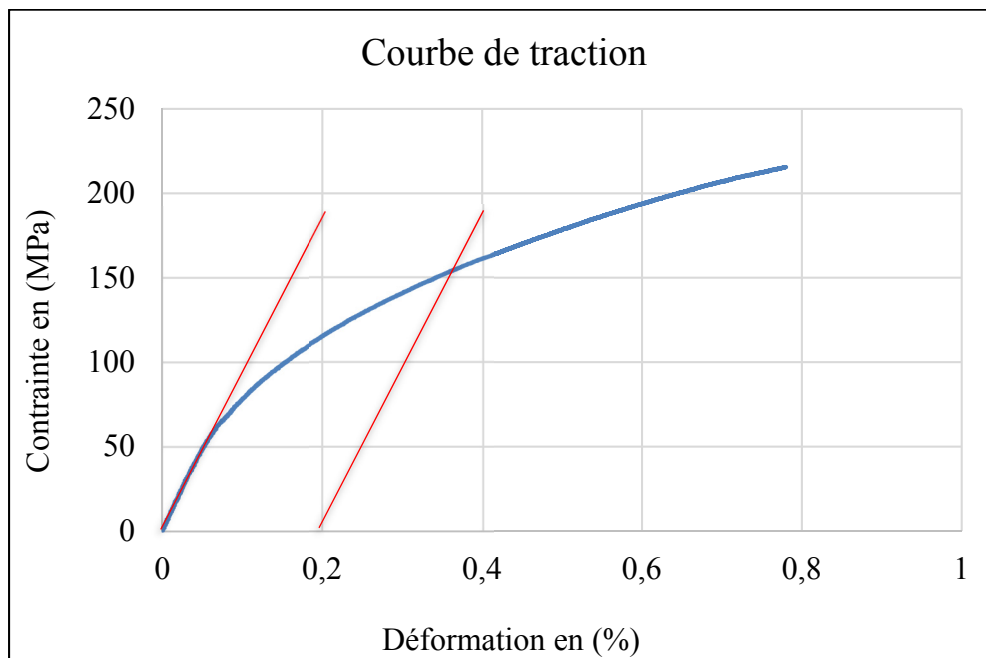


Figure 2-9 : Courbe de traction de l'alliage d'aluminium silicium MS43

Tableau 2-8 : Caractéristiques mécaniques de l'alliage MS43

MS43	$R_{e0,2}(MPa)$	$R_m(MPa)$	$E (GPa)$	$A \%$
<b>Expérimental</b>	150	230	117	0,94
<b>Théorique</b>	165	252	102	1,7

Après l'analyse de la surface et des bords de la zone de rupture, nous avons remarqué que les poches denses de silicium découvertes en analysant la microstructure ont aussi un effet négatif sur la résistance en traction. La figure 2.10 montre des fissures qui se propagent dans les zones denses et causent l'arrachement de la matière. Cela montre que le grand nombre des grains de silicium augmente le nombre de joints de grains et donc, facilite la propagation des fissures au fond de la matière.



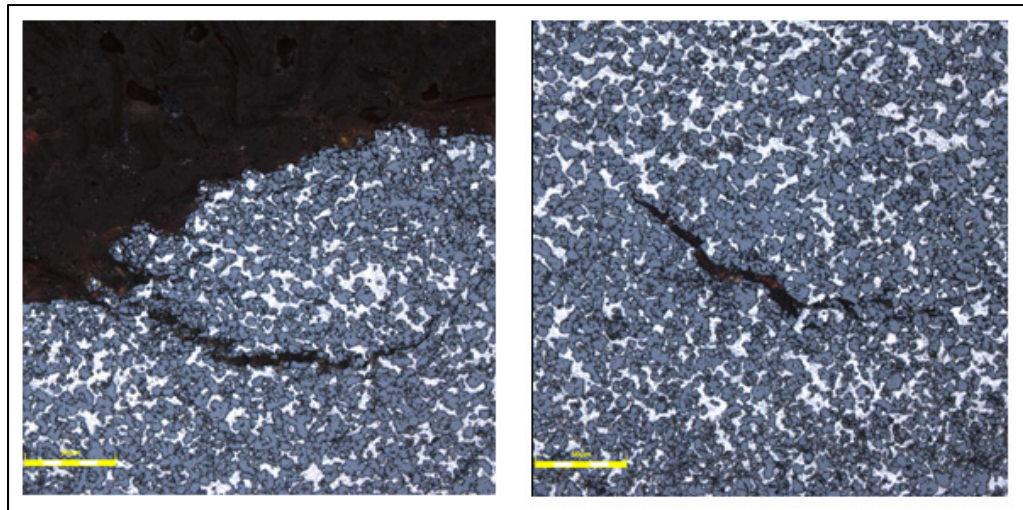


Figure 2-10 : Fissure sous l'effet de l'effort de traction sur l'alliage d'aluminium silicium MS43

Nous observons dans la figure 2.11, qu'une surface grise mat, une caractéristique de la zone de rupture fragile pour les matériaux qui sont extrêmement fragiles.

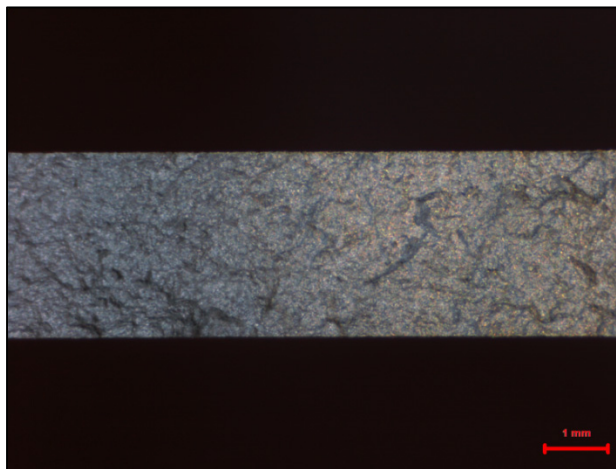


Figure 2-11 : Surface de rupture de l'alliage d'aluminium silicium MS43

## 2.4 Analyse de la microstructure

Afin de bien analyser notre matériau brut et déterminer le pourcentage de silicium, l'homogénéité et l'orientation des aiguilles dans le volume du métal qui touchent énormément

les propriétés mécaniques de ce dernier, nous avons réalisé des essais de dureté et une analyse de la microstructure. Pour réussir l'analyse de la microstructure, nous avons découpé notre lingot brut, poli et attaqué chimiquement nos échantillons. Dans ce cas, nous avons utilisé Keller's pendant 8 secondes plus au moins 2 secondes et qui nous a permis de voir clairement la microstructure.

La microscopie optique a révélé une structure à grains fins pour les échantillons préparés par trempe du métal liquide. Dans les travaux de Nikanorov et al. (2005) l'observation au microscope optique a montré l'évolution de la structure et les grains des échantillons des alliages d'aluminium avec (a) 11,5 %, (b) 20 %, (c) 25 %, (c) 30 %, (d) 35 %, du Silicium telle que l'illustre la figure 2.12.

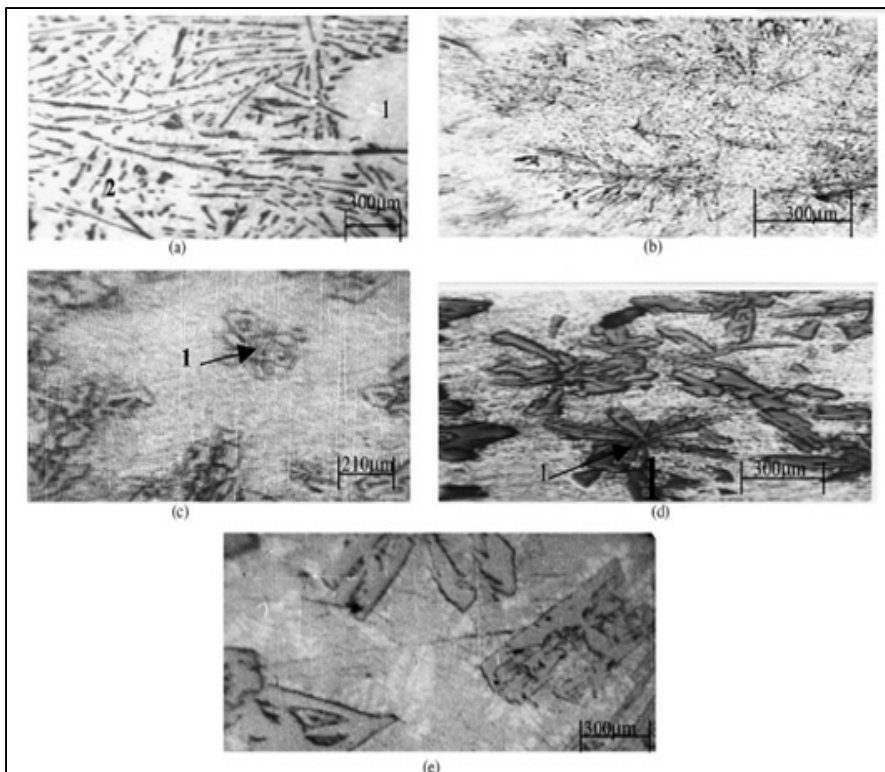


Figure 2-12 : Microstructure des alliages Al-Si par rapport à la teneur en Si tiré de Nikanorov et al. (2005) :  
(a) 11,5 %, (b) 20 %, (c) 25 %, (c) 30 %, (d) 35 %, de Silicium

Dans la Figure 2.12, nous observons une structure eutectique avec des cristaux primaires de solution solide Al-Si 11,5 %. L'alliage à 20 % de Si a un meilleur grain eutectique structuré.

Il existe des cristaux primaires de Si en forme d'étoile sur l'arrière-plan de la structure eutectique pour la composition de 25 % Si. La concentration et la taille des cristaux primaires augmentent avec l'augmentation de la teneur en Si (30 et 35 %).

Nous pouvons remarquer que, pour les alliages d'aluminium silicium non traités thermiquement, la microstructure se compose d'une matrice d'aluminium dans laquelle le silicium est en forme d'aiguilles. Par contre, pour notre alliage MS43 obtenu par refroidissement ultra rapide, le silicium prend la forme des grains comme le montre la figure 2.13.

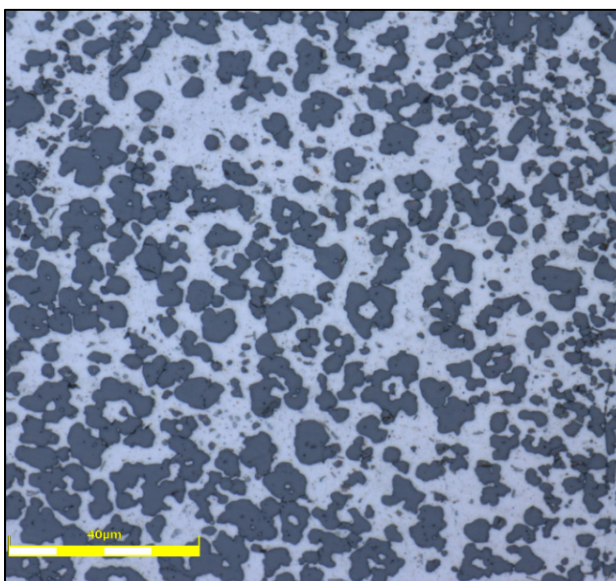


Figure 2-13 : Microstructure MS431

#### 2.4.1 Les défauts de la microstructure

Bien que cela ne soit pas bien visible sur la figure 2.14 du matériau MS43 ci-dessus, on y observe des petits grains noirs, cela pourrait être une trace de magnésium ou de carbure comme le montre la figure 2.15 des travaux effectués par Ramanujam, Muthukrishnan et Raju (2011). Cela requiert une analyse un peu plus profonde par un microscope électronique pour voir entre les grains et analyser la probabilité d'existence des éléments additionnés dans notre alliage MS43.

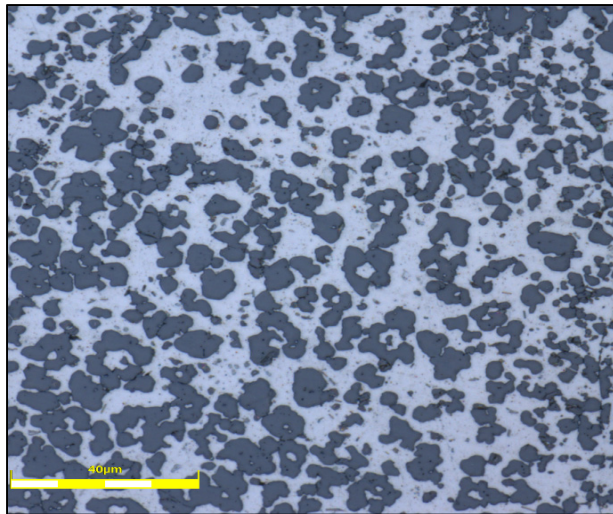


Figure 2-14 : Microstructure MS43

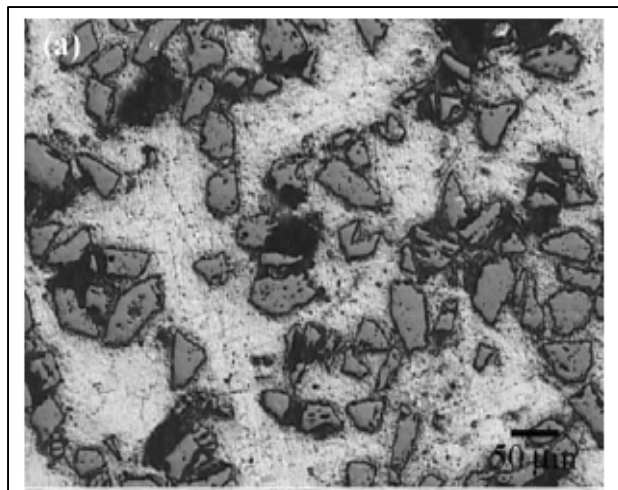


Figure 2-15 : Microstructure 10 % SiC 7.7 % Si,  
tiré de Nikanorov et al. (2005)

En plus, en nous déplaçant sur le plan de notre échantillon, nous remarquons l'existence des zones dans lesquelles la taille des grains de silicium devient plus petite que la taille dominante comme le montre la figure 2.16.



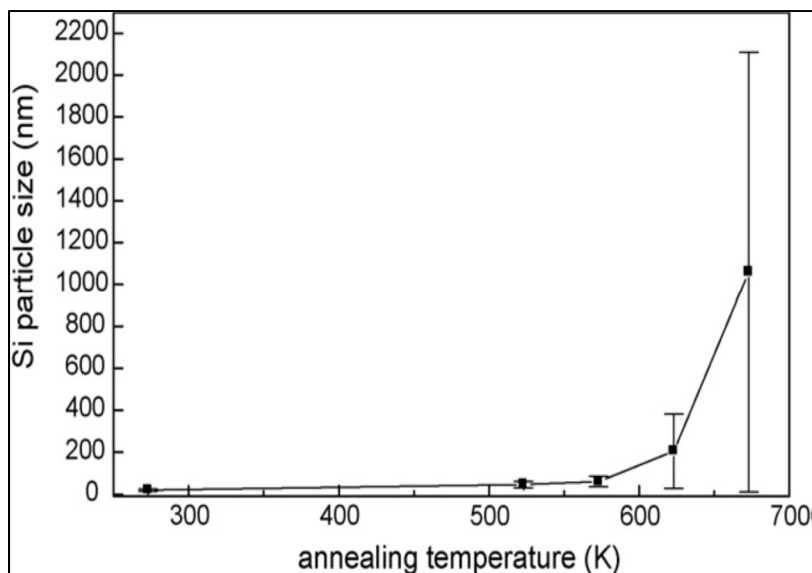


Figure 2-16 : La taille des grains de Si en fonction de la température, tiré de Birol (2007)

On comparant avec les résultats du travail de Birol (2007) de la figure 2.16, nous pouvons constater que la température de refroidissement n'était pas homogène, ou bien sous l'effet du procédé mécanique de fabrication engendre de l'écrasement du métal et l'emprisonnement des grains de silicium dans des poches comme le montre la figure 2.17.

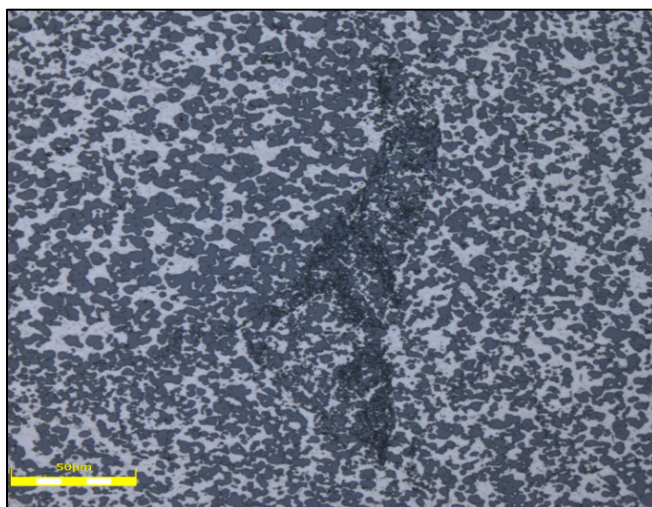


Figure 2-17 : Microstructure de l'alliage étudié MS43

Nous n'avons pas encore une idée claire et exacte qui explique sous quel phénomène se forment ces poches, et malheureusement ce problème se produit dans tous nos échantillons même dans la littérature nous n'y avons pas trouvé une explication claire. Par contre nous allons dans le paragraphe suivant, analyser leurs effets sur la résistance du métal après avoir appliqué les essais de traction et analysé la surface de rupture, nous pourrons en tirer une conclusion.

#### **2.4.2 Conductivité électrique**

Les travaux effectués par Mulazimoglu, Drew et Gruzelski (1989) présentent les changements de la conductivité électrique des alliages Al-Si-Mg trempés. Leurs caractéristiques ressemblent de près à ceux des alliages d'Al-Si-Mg-Sr avec des concentrations croissantes de silicium et de magnésium et de l'alliage MS43 refroidit rapidement.

La conductivité a été mesurée immédiatement après la trempe à l'eau. La conductivité des alliages ternaires d'Al-Si-Mg et quaternaires Al-Si-Mg-Sr diminue linéairement avec l'augmentation de la teneur en silicium à une vitesse d'environ 12 % IACS (soit 0,7 micro ohm/cm par % en poids de silicium), le même taux que celui observé dans les alliages binaires Al-Si. L'addition de magnésium réduit également la conductivité globale, comme on peut le voir sur la figure 2.18. Cela a été vérifié en comparant les variations de résistivité mesurées calculées à partir de la règle additive de Matthiessen Mulazimoglu, Drew et Gruzelski (1989). Les résultats confirment que l'effet combiné du magnésium et du silicium sur la résistivité obéit à la règle de Matthiessen.

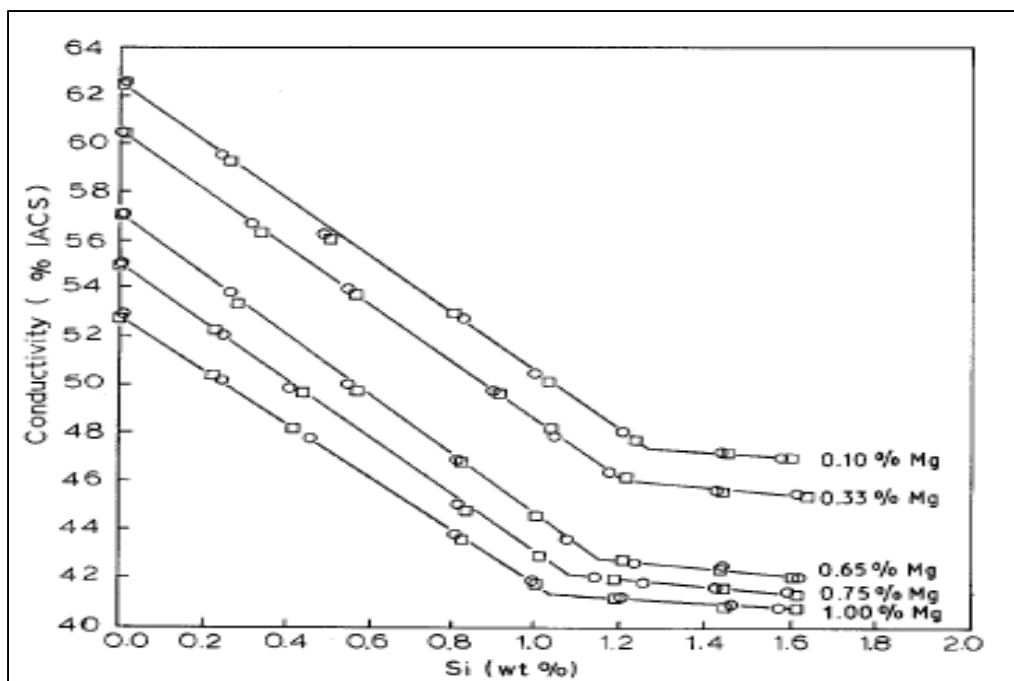


Figure 2-18 : Conductivités électriques des alliages Al-Si-Mg et Al-Si- Mg-Sr, tiré de Mulazimoglu, Drew et Gruzelski (1989)

La variation de la vitesse de refroidissement et le procédé mécanique de fabrication du métal affectent la taille des grains et engendrent des poches de silicium et donc la non-homogénéité de la microstructure. Nous constatons une fois de plus que le pourcentage de silicium provoque des variations au niveau de la conductivité électrique à partir des essais réalisés par CMQ figure 2.19.

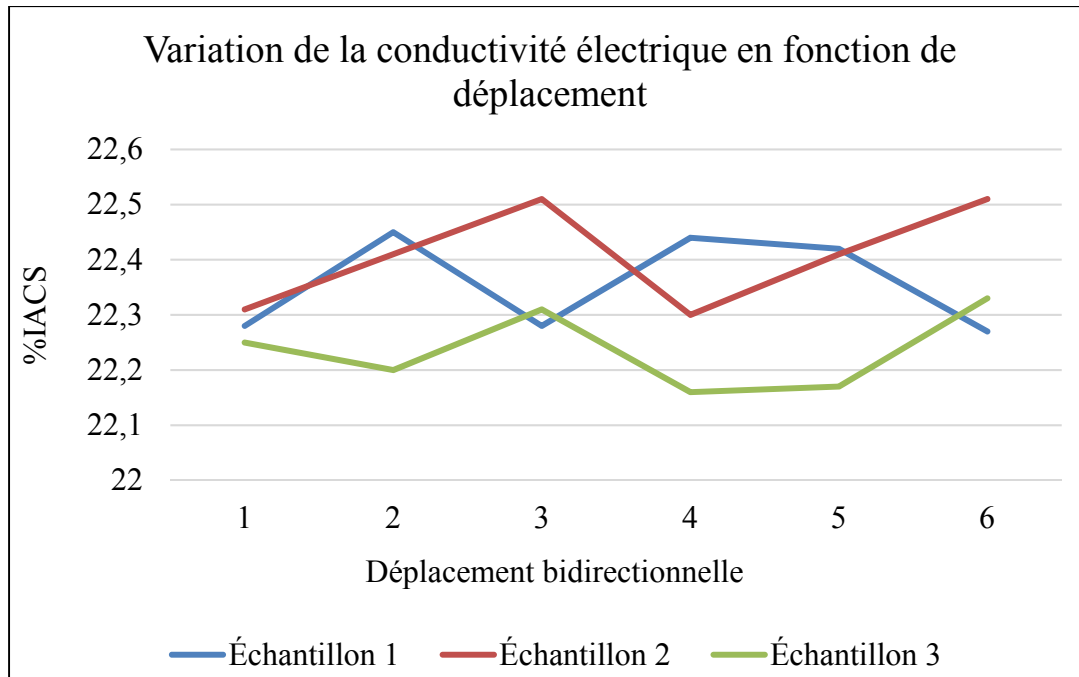


Figure 2-19 : Variations de la conductivité électrique en fonction de déplacement de l'électrode sur la surface de l'alliage MS43

Les poches de silicium qui conduisent à des zones à très haut pourcentage de silicium dans le volume du métal proviennent de la vitesse de refroidissement et du procédé de fabrication affectent la stabilité de la conductivité électrique. Nous pouvons encore remarquer que, la rugosité de surface n'a aucun effet sur la conductivité électrique telle que le montre la figure 2.20.

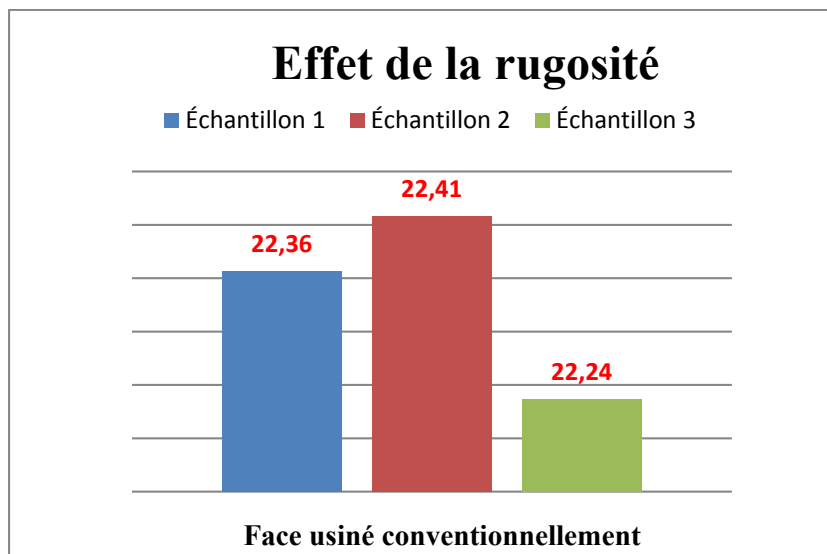


Figure 2-20 : Qualité de surface  $S_a$  ( $\mu\text{m}$ ) de la face usinée



## **2.5 Conclusion**

L'objectif global de ce chapitre était d'étudier les caractéristiques mécaniques et métallurgiques du métal MS43 avant de commencer à réaliser des essais d'usinage pour fabriquer une pièce adéquate et efficace pour une application de précision. Cela nous a permis d'avoir une idée sur les difficultés liées à l'usinage de ce métal. Principalement l'usinabilité qui provient de la dureté de l'alliage MS43 ainsi que la présence de silicium qui affecte énormément la durée de vie de l'outil et le fini de surface. La présence des poches dense en silicium peut être la cause principale des vibrations et de la rupture de nos outils au cours de l'usinage conventionnel.

Le prochain chapitre traite le matériel et les méthodes utilisées pour le traitement des données basées sur la stratégie des essais expérimentaux et des plans d'expériences, ainsi que la démarche expérimentale adoptée lors de cette étude.



## **CHAPITRE 3**

### **MÉTHODOLOGIE ET PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE**

#### **3.1 Introduction**

Dans ce travail nous étudions la fabrication des pièces en alliage d'aluminium avec un grand pourcentage de silicium pour application spécifique. Ce type de métal engendre des problèmes variés tels que les problèmes de fabrication sous l'effet de sa dureté, l'état de fini de surface, ses effets sur l'outil de coupe, les variations au niveau de la microstructure, etc.

Une méthodologie de travail est présentée dans ce chapitre afin de choisir les outils de coupe adéquats et réaliser un plan d'expérience fiable qui nous permet de réaliser nos essais expérimentaux.

#### **3.2 Problématique**

Le problème technique est la difficulté d'avoir une rugosité maximale de  $0.4\text{ }\mu\text{m}$  et une planéité de  $0.0254\text{ mm}$ , avec des exigences géométriques et dimensionnelles de diplexeur, ainsi que les propriétés mécaniques du métal sélectionné pour cette application.

Dans le cas des conditions et des exigences mentionnées dans le plan technique pour notre pièce à fabriquer qui doit satisfaire le fonctionnement du produit, nous devons investir trop du temps et des moyens pour arriver à produire une pièce conforme. Il est très difficile de faire plusieurs essais avec plusieurs outils de différents diamètres, choisir les paramètres de coupes et le revêtement d'outil qui assurent le meilleur résultat au niveau de la qualité de la microstructure de la pièce. En plus le matériau est très abrasif sous l'effet du silicium donc on doit bien choisir les paramètres de coupes pour contrôler la durée de vie de l'outil.

### 3.3 Objectifs

#### ❖ Objectif principal :

L'importante manque d'information quant au paramètre d'usinage pour des alliages à haut pourcentage de silicium (supérieur de 50 % Si), ainsi que l'absence des recommandations de la part des fournisseurs d'outils de coupe. Notre objectif est de créer une base de données fondée sur des interpolations des paramètres de coupe optimaux selon une grande plage des diamètres d'outil.

#### ❖ Décomposition de l'objectif :

- Tracer les courbes des paramètres de coupes optimaux en fonction de différents diamètres d'outil et la valeur de rugosité, avec une suivie de l'évolution de la micrographie et les défauts (précipités, fissures, contraintes internes) de la surface usinée.
- Observer les défauts qui apparaissent sur les faces fonctionnelles de l'outil, augmenter le débit d'enlèvement de matière et la qualité de fini de surface.
- Analyser l'effet des paramètres de coupe sur l'état de surface et les défauts au niveau de microstructure de la pièce finie.
- Analyser les efforts de coupes et la vibration.
- Optimiser les paramètres de coupe en assurant la qualité exigée.
- Construire une base de données : sous l'effet de la géométrie de la pièce, on est obligé d'utiliser plusieurs outils avec différents diamètres. Ce qui nous a fait penser à faire une base de données basée sur les paramètres de coupe et avoir une idée sur l'état de surface et la microstructure, à partir des essais expérimentaux, l'interpolation et des modèles théoriques.

### 3.4 Méthodologie de travail

#### 3.4.1 Plan d'expérience

Pour un tel processus d'usinage, si nous voulons avoir une idée sur la dépendance des variables de sortie, il nous faut d'abord répondre à plusieurs questions et éviter plusieurs difficultés :

- Déterminer l'influence de chaque paramètre de coupe et les classer selon leurs importances ;
- Déterminer les interactions entre les paramètres ;
- Essayer de linéariser le processus en fonction de ces paramètres ;
- Essayer de trouver le meilleur processus pour maximiser l'information obtenue et minimiser le nombre de mesures.

L'application d'un plan d'expérience sur une telle situation nous permet de répondre à ces points, comme il peut être applicable dans de nombreux processus. Les plans d'expériences nous aident à bien organiser les expériences qui devraient être réalisées dans toutes les recherches scientifiques et même industrielles (Goupy et Creighton, 2006).

À partir du moment où nous voulons déterminer un lien qui existe déjà entre un paramètre objectif  $X$  et des variables  $Y_i$ . Il faut penser à modéliser le problème avec une équation de type  $y = f(x_i)$  et appliquer le plan d'expérience. Chaque expérimentateur adopte un plan d'expérience selon le cas rencontré alors il existe de nombreux plans, et dans notre cas nous cherchons à réaliser un modèle expérimental et non pas juste de déterminer les paramètres optimaux, dans ce cas-là nous ne pouvons pas utiliser un plan qui élimine quelques essais, il faut juste adopter une démarche rigoureuse selon des règles mathématiques (Box, Hunter et Hunter, 1978).

Comme déjà mentionnés, nous utiliserons un plan de type factoriel complet (un facteur à la fois) pour chaque outil de coupe, nous réalisons tous les essais qui peuvent nous permettre d'avoir un modèle de la réponse sous forme d'un polynôme mathématique. Dans notre étude, cinq niveaux au minimum sont nécessaires afin de pouvoir prédire les effets des facteurs. Ils modélisent l'évolution de la réponse.

### 3.4.2 Modélisation des réponses

Pour des raisons économiques et en cherchant la solution au problème posé initialement, on essaie de minimiser le nombre des essais à réaliser, dans l'objectif de relier les facteurs aux réponses en se basant sur des relations mathématiques et statistiques.

Un modèle mathématique polynomial est proposé pour chacune des réponses (variable expliquée  $Y_i$ ) en fonction des facteurs (variables explicatives  $X_i$ ). En partant de l'hypothèse que toutes les variables indépendantes soient quantifiables ou mesurables, le polynôme des réponses s'écrit sous la forme suivante :

$$Y_i = AX_i + B \quad (3.1)$$

Où :

- A, B : des constantes qui vont être déterminées à partir des résultats des expériences
- Y, X : sont respectivement les réponses et les facteurs.

### 3.4.3 Planification des essais expérimentaux

Dans cette étude, nous avons opté pour un plan factoriel complet nous permettant de tester nos variables à cinq niveaux, et ce pour toutes les combinaisons possibles entre les facteurs étudiés (vitesse de coupe et avance par dent). La détermination du tableau nous permet de savoir le nombre d'essais à réaliser. Celui-ci est égal au nombre de degrés de liberté de l'expérience. On a précisé cinq degrés de liberté pour chaque facteur. Les réponses qui vont être étudiées sont la topographie de surface, la vibration de la pièce et les efforts de coupe appliqués de l'outil sur la pièce.

Ce plan et ce nombre d'essais doivent être multipliés par le nombre d'outils pour avoir un plan complet et une prévision complète en fonction de différents diamètres d'outils.

Le tableau 3.1 nous aide à voir les facteurs et les variations appropriées ainsi que la source des données utiliser.

Tableau 3-1 : Plan d'expérience pour cinq différents diamètres d'outil

Outils	T1	T2	T3	T4	T5	Notes
Diamètre de coupe (mm)	1,194	2,286	3,175	4,750	6,350	Propriétés d'outil
Rayon de coins (mm)	0,381					
Profondeur de passe radiale (mm)	0,119	0,229	0,318	0,475	0,635	Harvey Recommandation
Profondeur de passe axiale (mm)	3,581	6,858	9,525	12,700	12,700	Harvey Recommandation
Vitesse de coupe (m/min)	91,44	137,16	137,16	137,16	137,16	Harvey Recommandation*
	76,20	121,92	121,92	121,92	121,92	Variation 5 %
	60,96	106,68	106,68	106,68	106,68	
	45,72	91,44	91,44	91,44	91,44	
	30,48	76,20	76,20	76,20	76,20	
Avance par dent (mm/dent)	0,0169	0,0188	0,0251	0,0376	0,0503	Harvey Recommandation*
	0,0162	0,0178	0,0241	0,0368	0,0495	Variation 5 %
	0,0149	0,0165	0,0229	0,0356	0,0483	
	0,0136	0,0152	0,0216	0,0343	0,0470	
	0,0124	0,0140	0,0203	0,0330	0,0457	
* Recommandation du fournisseur pour des alliages d'aluminium avec 12 < % SI < 16						

Nous pouvons exprimer le nombre des essais comme "(A^B) C" où "A" présente le nombre des niveaux pour chaque facteur, "B" le nombre de variables indépendantes ou facteurs et "C" le nombre d'outils utilisés. Puisque, nous avons 25 expériences à faire pour chaque outil séparément. En considérant que nous utilisons un plan d'expérience factoriel complet, nous ne sommes pas obligés de vérifier l'orthogonalité de notre tableau.

Après avoir exposé nos paramètres et notre plan d'expérience, et pour diminuer le temps et le coût, nous sommes demandés de réaliser un ordonnancement des essais. Après chaque équilibrage d'outil, nous réalisons plusieurs fois la variation des paramètres de coupe pour maximiser le nombre d'échantillons usinés. En plus pour éviter la répétition de la mise et le maintien en position de chaque échantillon, nous avons optimisé au niveau de la programmation numérique CN pour optimiser le temps et les coûts des manipulations. Notre plan d'usinage est ordonné de la manière suivante : tous les essais sont à sec, l'acquisition des

données de vibration d'outils et les efforts de coupes sont réalisés en premier, ensuite les essais avec arrosage pour analyser la microstructure et l'état de surface sont déroulés.

### ❖ Calcul d'erreur

L'écart type nous permet d'avoir une estimation sur la reproductibilité des mesures :

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

$x_i$  : Des valeurs déterminées à partir d'une série de n mesures ;

$\bar{x}$  : La valeur moyenne d'une série de n mesures ;

n : le nombre total des mesures.

Pour chacune partie de nos mesures effectuées, une analyse statistique a été faite. Par exemple, pour les mesures de dureté, les mesures de pourcentage de volume, les essais de tractions, les tests de conductivité électrique, l'usinabilité ainsi que pour les autres parties, nous avons appliqué la même stratégie pour les mesures de rugosités.

## 3.5 Équipements

### 3.5.1 Machine d'usinage

Les essais ont été réalisés sur un centre d'usinage HURON K2X10 à l'école de technologie supérieure. Dans le centre d'usinage, le déplacement linéaire est suivant les trois axes X, Y, Z avec une vitesse qui peut aller jusqu'au 60 m/min et une accélération de l'ordre de 1g, 28.000 tr/min comme vitesse de rotation maximale, la zone de travail est de 1150 x 800 mm et le poids maximal acceptable ne dépasse pas 3000 kg. Pour la fabrication du prototype à la fin du projet au sein de la société Nétur on a sélectionné un centre d'usinage 5 axes après avoir réalisé tous



les analyses nécessaires pour optimiser au niveau de la fabrication. L'analyse a été basée sur différents paramètres comme montre le tableau ci-dessous :

Tableau 3-2 : Configuration de la machine selon les paramètres exigés/recommandés

Caractéristiques	Détail
La précision	$\pm 0,0005$ pouce en fraisage $\pm 0,00025$ pouce en perçage
Caractéristiques dimensionnelles de la table ou plateau porte-pièce	Broche se déplace en translation suivant X de 41 pouces Table se déplace en translation suivant Y de 22 pouces Table tournante suivant l'axe B de 360° Table tournante suivant l'axe C de 360° Tête se déplace en translation suivant Z de 18 pouces
Vitesse de dépassement	1559,9 pouces/min
Logiciel de conception et code de programmation machine	Mastercam X9 qui génère le code G0
Fréquence de rotation de la broche	15000 tr/min
Vibrations	Bien placer le point de fonctionnement dans la courbe de puissance machine
Arrosage	Arrosage standard
Type de lubrifiant	Blaser - Blasocut

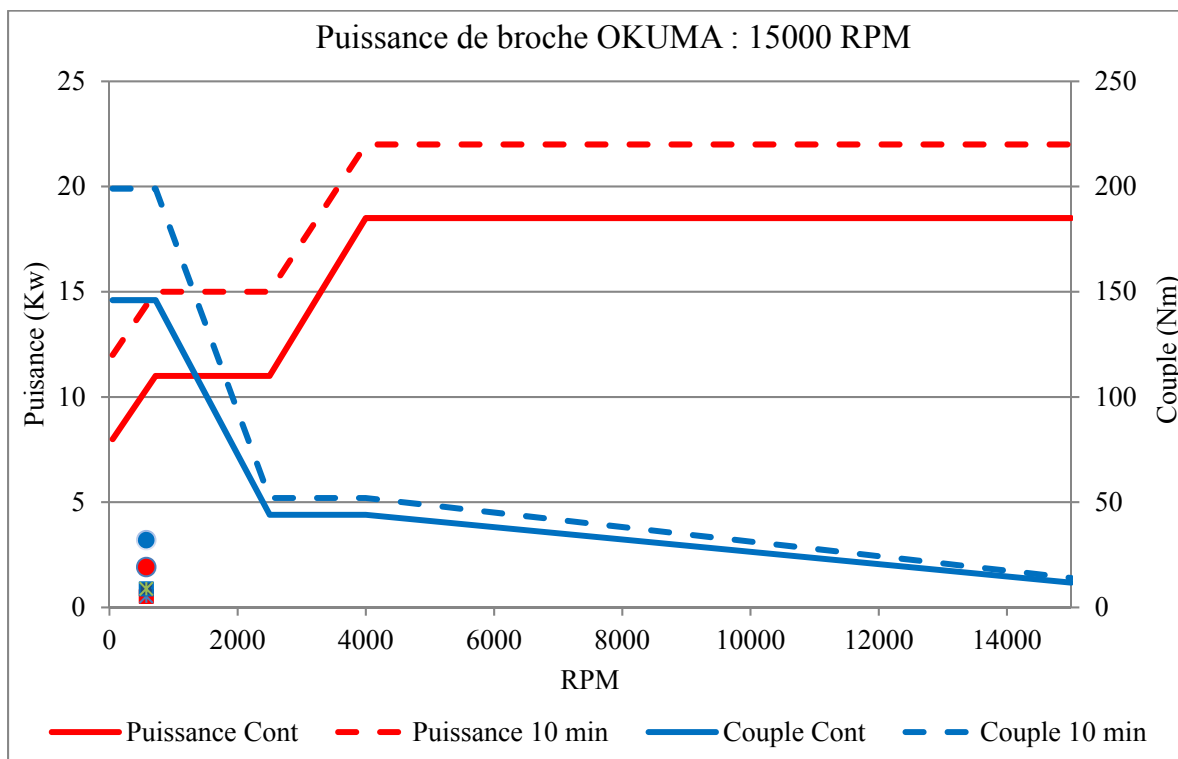
#### ❖ Point de fonctionnement et courbe de puissance

Nous avons travaillé sur la détermination de point de fonctionnement limite pour la machine chez notre partenaire industriel pour éviter que la machine travaille dans la zone de résonance ce qui va générer de vibrations, et en exploitant la cadence maximale de celle dernière. Différents paramètres ont été pris en considération pour tracer le point de fonctionnement. La puissance de coupe est l'un des facteurs importants à déterminer, surtout pour les opérations d'ébauche dans l'aluminium, elle permet :

- De sélectionner la machine de puissance adaptée au travail à réaliser ;
- De déterminer les conditions de coupe qui maximise au mieux la puissance et le débit de la machine, en prenant en compte la résistance mécanique de l'outil bien sûr.

Lors du choix de la machine on doit également tenir compte du couple admissible pour des outils de grand diamètre, des gammes de vitesse et d'avance disponibles.

Ces éléments nous permettront ensuite de choisir la machine sur laquelle il sera possible d'exécuter cette opération de fraisage dans les meilleures conditions, ce qui montre le point de fonctionnement dans la courbe de puissance ci-dessous.



### 3.5.2 Rugosimètre

Les mesures des différents types de fini de surface des échantillons préparés ont été réalisés par un rugosimètre électronique par le traitement des images prisent par le microscope laser « OLYMPUS OLS4100, LEXT » figure 3.2. L'analyse de fini de surface avec ce microscope nécessite des renseignements et des paramètres très spécifiques trouvés dans (Aidibe et al., 2016), et qui peuvent assurer des bons résultats pour cette étude.

Les résultats sont obtenus après avoir mesuré la surface avec la rugosité arithmétique surfacique, ce qui nous permet d'avoir une valeur moyenne sur toute la surface sans faire plusieurs mesures pour valider la répétabilité des résultats, suivant la direction d'usinage et la direction axiale de l'outil.

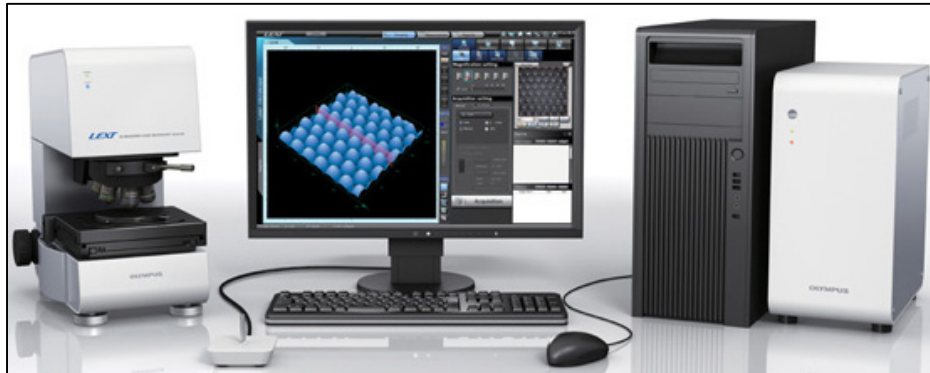


Figure 3-2 : Microscope laser utilisé pour la mesure de rugosité

### 3.5.3 Microscope confocal

Un microscope confocal à balayage laser est un système pour scanner la surface séquentiellement point par point, ligne par ligne ou plusieurs points à la fois et assemble les informations de pixel sur une seule image. En conséquence, les tranches optiques de l'échantillon sont représentées par un contraste élevé et une haute résolution dans  $x$ ,  $y$  et  $z$ . La microscopie confocale soutient les applications exigeant la sensibilité dans les sciences de la vie ainsi que pour les tâches topographiques sur les surfaces de matériaux.



Figure 3-3 : Microscope confocal à balayage laser

### 3.5.4 Accéléromètre

Les caractéristiques des accéléromètres sont diverses, mais la sensibilité est exigée pour bien mesurer des vibrations de faible amplitude pour différents signaux harmoniques et des analyses complexes. On utilise dans cette étude un ICP Triaxial Accelerometer selon la méthode Back-to-Back Comparaison (AT401-3), avec une sensibilité de  $1,037 \text{ mV/m/s}^2$  selon l'axe X,  $1,022 \text{ mV/m/s}^2$  selon l'axe Y et  $1,022 \text{ mV/m/s}^2$  selon l'axe Z pour  $100,00\text{Hz}$ .

Les principaux composants sont :

- L'accéléromètre : cristal induit une différence de charge entre ses surfaces ;
- Partie commande ou l'unité central ;
- Générateur de courant pour chaque axe pour activer l'amplificateur par une source constante de courant ;
- Un amplificateur sensible aux charges et est convertie en signal de tension.

L'acquisition des données de vibration nous permet d'avoir une idée sur l'effet des efforts de coupes sur la rigidité d'outil ainsi que sur l'état de surface.

### 3.5.5 Dynamomètre

La consommation d'énergie au cours d'usinage varie énormément en fonction des efforts de coupes. Cela nous permet d'avoir une idée raisonnable sur la performance d'usinage et d'usinabilité. Donc, c'est essentiel d'étudier l'influence et la variation des efforts de coupe. Pendant l'usinage, l'outil enlève par déformation plastique le copeau et ce contact génère des efforts de coupes qui affectent énormément la durée de vie de l'outil et la pièce usinée. Les figures 3.4 et 3.5 présentent une décomposition des efforts de coupe générés au moment de l'usinage orthogonal. C'est très difficile d'appliquer des calculs théoriques pour déterminer l'effort de coupes, donc nous avons utilisé la table dynamométrique Kistler capable de mesurer directement les efforts dans trois directions X, Y et Z ( $F_x$  ;  $F_y$  ;  $F_z$ ) en pratique.

Pour étudier les processus de fraisage, nous avons fixé la pièce étudiée sur un étau qui était fixé sur la plaque supérieure de la table. Les efforts générés par le contact outil en rotation et la matière ont été mesurés par le dynamomètre via la pièce à usiner.

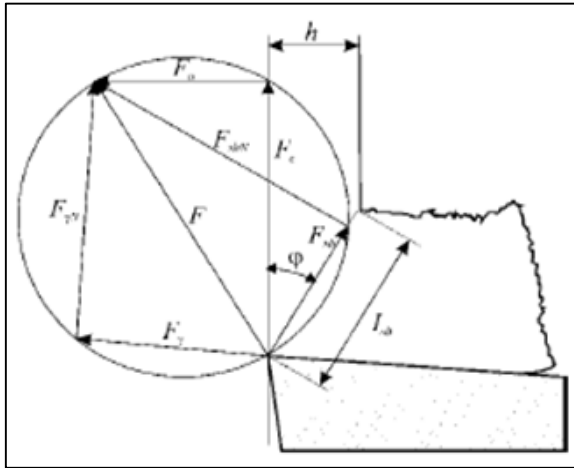


Figure 3-4 : Efforts de coupe  
(Balazinski, 2009)

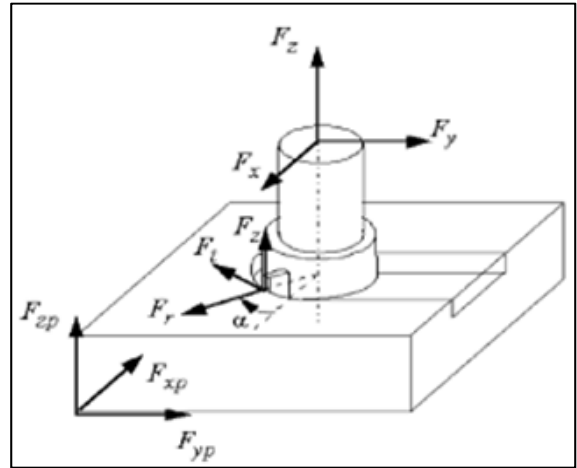


Figure 3-5 : Efforts de coupe au fraisage  
(Balazinski, 2009)

Le système d'acquisition dynamométrique de trois axes Kistler 9255B, figure 3.6, nous permet de l'acquisition des forces générées par l'enlèvement de matière. Ce dynamomètre permet de mesurer des forces allant de -20 kN à 200 kN dans le plan de coupe et de -10 kN à 40 kN sur l'axe vertical.



Figure 3-6 : Système d'acquisition dynamométrique  
Kistler 9255B

Selon nos objectifs, nous avons besoin de connaître les efforts de coupe selon les trois axes qui peuvent être déterminés par la formule (3.3) suivante :

$$F_c = (F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)^{1/2} (N) \quad (3.3)$$

Le matériau usiné, la géométrie de l'outil, les conditions et paramètres de coupe, le mode de lubrification, etc. sont les variables qui ont une influence majeure sur la variation des efforts de coupe. Dans notre projet nous ciblons les paramètres de coupe comme des variables, et nous avons fixé ceux de l'outil sauf le diamètre, le matériau est déjà choisi par la société mère du projet « MDA » et un mode de lubrification standard.

### **3.6 Conditions d'usinages**

#### **3.6.1 Outils de coupe**

##### **❖ Fraisage**

L'usinage des alliages dur et abrasif demande des outils résistant à la chaleur dégagée au niveau de point de contact outil matière ainsi que l'usure des surfaces fonctionnelles d'outil. Pour ce faire, toutes les recherches recommandent des outils revêtus.

Les objectifs principaux d'un revêtement sont avant tout de protéger l'outil contre les efforts de coupes agressives extérieures qu'il subit lors de l'usinage. La température générée au cours d'usinage et au niveau du point de contact peut atteindre 600°C.

Donc le revêtement sur les outils de coupe délimite :

- L'usure de l'outil ;
- L'adhésion entre les deux matériaux en contacte ;
- L'oxydation de la surface ;
- Diffusion des particules de l'outil sur la surface de la matière usinée.

On se basant sur la recommandation des fournisseurs d'outil on a fait un choix préliminaire de revêtement d'outil. Selon la recherche bibliographique, on a fait la sélection des outils avec le

revêtement de diamant. À part le revêtement et le matériau d'outil, pour qu'il résiste à la chaleur aux chocs et à l'usure, nous devons prendre en considération la géométrie de ce dernier, la géométrie de la pièce brute et finie, évidemment sans négliger bien sûr le mandarin et les fixture. Toutes ces mesures sont primordiales pour bâtir la pièce en respectant le cahier de charge. Mais l'analyse approfondie et la prise en considération de l'interaction entre ces paramètres nous permettent de réaliser l'optimisation du temps, des ressources et du coût. Le bon contrôle de ces paramètres peut limiter notre zone de travail donc le nombre des outils, par la suite le nombre de phases de fabrication, le temps de préparation et de manipulation. Et pour faire le choix de nos outils nous avons préparé le tableau 3.3 ci-dessous à partir duquel nous pourrions contrôler notre besoin et appliquer des modifications du choix des outils au fur et à mesure de l'avancement du travail et des modifications que nous pourrions faire sur les autres paramètres.

Tableau 3-3 : Description des phases et des opérations à appliquer  
avec les exigences imposées

Opération	Phase	Description	Diamètre du corps + mandrin (Max)	Diamètre de coupe (Max)	Longueur totale (Min)	Longueur coupante (Min)	Rayon de coupe
A	1	Surfaçage et ébauche, surface non finie					
		Fraisage circulaire des trous, surface non finie		0,5		0,2	choix
		Contournage, surface non finie, outil de forme				0,125	0,006 max
B	2	Usinage de la première face					
		Ébauche de la rainure, surface non finie		0,125		0,5	0
		Contournage de la rainure, surface finie		0,096		0,5	0
		Contournage des bosses sur le contour, surface finie		0,25		0,12	choix
		Balayage des crêtes sur la face, surface finie, outil à bout sphérique					
	3	Surfaçage de la face 1 du contour, surface finie					
	4	Surfaçage de la face 2 du contour, surface finie					
		Usinage des épaulements, surface finie		0,4		0,01	0
	5	Ébauche de la rainure, surface non finie	1,9	1,6	1,5		
		Usinage de l'épaulement, surface finie	0,24	0,11	1,5	0,01	0
	6	Le même outillage et la même stratégie d'usinage que la phase 4					
C	7	Ébauche de la deuxième face de la pièce, surface non finie		1	0,5	0,4	choix
		Ébauche de la forme géométrique, surface finie	0,5	0,3	0,8	0,4	0
		Ébauche de la forme géométrique, surface finie avec les congés	0,5	0,14	0,8	0,6	0,015
		Balayage des crêtes sur la face, surface finie, outil à bout sphérique					
		Contournage pour les congés de la forme géométrique	0,5	0,08		0,13	0,015



D'abord les dimensions et la géométrie de la pièce finie ont limité notre choix dans le sens qu'on doit chercher des fournisseurs qui peuvent nous fournir les outils qu'on cherche avec la miniature souhaitée. Après avoir fait des comparaisons et avec l'expertise du staff technique de « Nétur » notre choix a convergé vers les recommandations du catalogue « *harvy tool* ». Puis nous avons sélectionné nos outils (Annexe 1) et avec lesquels nous avons créé notre plan d'expérience et sélectionner les zones critiques pour appliquer nos essais.

### ❖ Perçage

Le travail de (Songmene, Khettabi et Kouam, 2012) montre que pour bien percer une surface brute sans casser l'outil ou endommager la pièce, la meilleure façon est d'utiliser une haute vitesse de rotation de la mèche et une vitesse d'avance faible. Et de préférence aussi de percer une surface après l'avoir préparée avec un trou de centrage (Niknam, Kouam et Songmene, 2016). Un trou de centrage donne donc de meilleurs résultats quant à la quantité et la précision dimensionnelle et géométrique de trou. En prenant en considération que notre matériau est dur donc fragile, nous avons travaillé pour choisir les bonnes mèches pour perçage et les pointeurs pour réaliser nos objectifs.

Le nombre d'outils associés à chaque trou dans le tableau ci-dessus est pour distinguer les trous selon les exigences géométriques. L'annexe 3 représente les différents numéros d'outil avec la référence dans le catalogue des fournisseurs, la sélection des paramètres de coupes de perçage été baser sur la littérature, les exigences des fournisseurs et l'expérience ou la recommandation des agents de la société partenaire « Nétur ».

### 3.6.2 Paramètres de coupes

La vitesse de coupe et les pressions de coupes sont inversement proportionnelles, mais de manière relativement faible. Le facteur de correction est fixé pour une vitesse de coupe  $V_c$  allant de 20 à 600 m/min, et varie en fonction du matériau usiné. Cependant, nous pouvons utiliser l'approximation par la relation suivante :

$$K_v = \left( \frac{100}{v} \right)^{m_v} \quad (3.4)$$

Avec :  $m_v = 0,143$  pour  $v_c = 20 \dots 100 \text{ m/min}$

$m_v = 0,071$  pour  $v_c > 100 \text{ m/min}$

$v_c = v$  : Vitesse de coupe en  $\text{m/min}$

### Décomposition des vitesses

Le plan de travail est le plan passant par le point d'application de l'effort global de coupe et tangent à la surface usinée. C'est dans ce plan que sont définis les deux vecteurs représentant respectivement la vitesse de coupe  $V_c$  et la vitesse d'avance  $V_f$ . La vitesse de coupe est dirigée dans la direction et le sens du mouvement principal de coupe, tandis que la vitesse d'avance décrit le mouvement d'avance de l'outil.

### 3.6.3 Stratégie d'usinage

#### ❖ Stratégies de coupe

Pour bien choisir la stratégie adéquate pour chaque partie à usiner dans notre diplexeur, une étude des stratégies de fraisage est recommandée. Cette étude va influencer significativement la qualité de fini de surface, le temps de fabrication et elle optimise le coût d'usinage d'environ 30 % (Altan, Lilly et Yen, 2001). L'un des objectifs du stage chez Nétur été de se concentrer sur l'étude et la définition de la stratégie de coupe lors de l'usinage de la forme géométrique complexe, dans l'objectif d'optimiser le processus de coupe.

Jusqu'ici et d'après (Choy et Chan, 2002), les trois principales trajectoires d'outil développées sont le mode allé simple, contour parallèle et zigzag. Pour les trajectoires allers simples et zigzag sont facilement à produire, par contre l'inconvénient avec la trajectoire aller simple est qu'on aura une quantité de surface considérable, mais un temps non productif très élevé, alors que la trajectoire est bidirectionnelle en zigzag au cours de laquelle le temps non productif est négligeable. En même temps l'alternance de coupe de cette méthode est un inconvénient qui peut causer des problèmes, comme l'usure rapide de l'outil de coupe.

L'anomalie entre le temps de cycle idéal et réel été le sujet de (Monreal et Rodriguez, 2003), dans lequel ils ont établi une méthodologie pour prédire le temps de cycle d'usinage durant une opération de fraisage en mode Zigzag et ils se sont intéressés à l'influence et l'importance de la trajectoire adoptée sur le temps de cycle.

#### ❖ **Orientation de l'outil**

Au cours des dernières années, l'effet de l'orientation angulaire de l'outil sur la rugosité a été étudié par plusieurs chercheurs (Baptista et Simoes, 2000), ont conclu qu'une orientation verticale de l'outil et un angle de la pièce entre  $10^\circ$  et  $20^\circ$  provoquent une durée de vie d'outil élevée et une meilleure rugosité. Ils démontrent qu'une inclinaison dans la direction de l'avance améliore la rugosité de la surface. Dans notre travail l'usinage de toute la pièce a été réalisé avec une trajectoire d'outil aller-retour pour la majorité des surfaces usinées.

#### **3.6.4 Composantes de l'effort de coupe**

L'effort total de coupe qui agit sur l'outil lors de l'usinage, d'après le sens du mouvement de l'outil et de la pièce usiner, est composé de :

- Une force d'avance : c'est la force la plus grande, tangente à la surface usinée de la pièce et qui agit dans la direction de vitesse de coupe ;
- Une force de coupe : cette composante diminue lorsque l'angle de direction de l'arrêt de coupe de l'outil augmente, sa valeur est proportionnelle à la vitesse d'avance et elle agit parallèlement à la direction de l'avancement de l'outil ;
- Une force passive : cette composante ne consomme aucune puissance puisqu'il n'y a pas de vitesse dans cette direction de déplacement de l'outil, elle sert à maintenir l'outil à la profondeur de coupe désirée et elle est perpendiculaire au plan d'usinage.

Il est intéressant de noter qu'il existe nombreux renseignements concernant le calcul des valeurs de la force de coupe, car elle est dimensionnant pour la puissance de la machine-outil. Par contre, la force d'avance et la force passive sont beaucoup moins bien connues. Malheureusement, dans le problème qui nous occupe, c'est la force passive puis la force

d'avance qui sont importantes, puisqu'elles sont essentiellement responsables des défauts engendrés lors de l'usinage.

### 3.6.5 Analyse de contraintes

L'objectif de cette partie consiste à appliquer une simulation des contraintes et des déformations de la pièce et du fixture sous sollicitation de l'outil de coupe, et les efforts générés par la machine. On a utilisé l'atelier « *Generative Structural Analysis* » du logiciel de CAO, CATIA V5. Ce logiciel utilise le maillage du volume de matière et la méthode numérique des éléments finis. On a défini la géométrie du fixture et les caractéristiques mécaniques du matériau tableau 3.4, le but est de simuler les contraintes de « Von Mises », ainsi que les déformations pour éviter que la pièce se brise au cours de fabrication.

Tableau 3-4 : Les propriétés mécaniques de l'alliage 6061 (Matweb, 2017)

<b>Propriétés mécaniques</b>	
Dureté Brinell	95 HB
Dureté Knoop	120 HK
Dureté Rockwell A	40 HRA
Dureté Rockwell B	60 HRB
Dureté Vickers	107 HV
Résistance ultime à la traction	<u>310 MPa</u>
Résistance à la traction	<u>276 MPa</u>
Allongement %	<u>12 %</u>
Module d'élasticité	<u>68,9 GPa</u>
Coefficient de poisson	0,33

Il fallait analyser l'effet des charges uniaxial, à l'intérieur des matériaux ainsi que sur la surface extérieure, pour dimensionner les différentes composantes de la structure. Les autres modes de chargements et de contraintes n'ont pas été prises en considération (par exemple la torsion) puisque la fixture n'est pas sollicitée par ce mode de chargement. De plus, une analyse a été faite pour assurer que le matériau pouvait supporter les efforts appliqués par différents outils de coupe, avec différents paramètres de coupe figure 3.7.

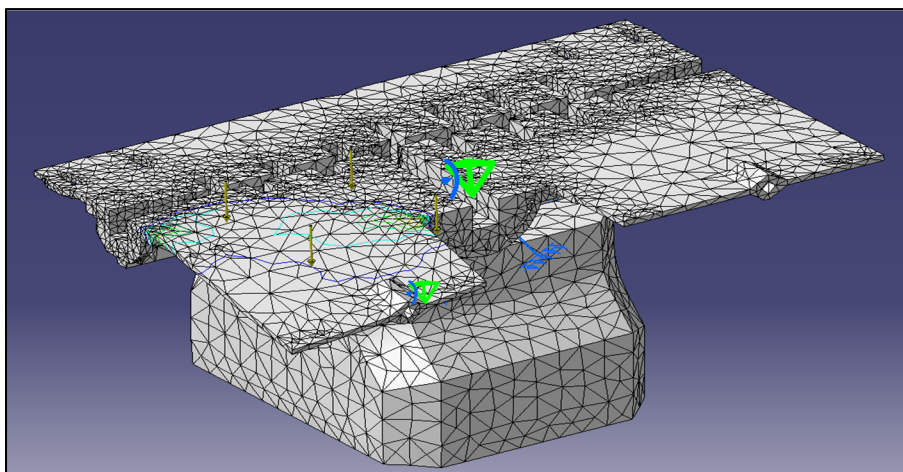


Figure 3-7 : «Generative Structural Analysis» du logiciel de CAO

Finalement, la philosophie de l'analyse était de prendre le chargement, et de le placer virtuellement dans des situations où les contraintes appliquées sur le matériel du fixture (aluminium Al6061-T6) seraient maximales, pour connaître les dimensions minimales que la fixture doit posséder. Après avoir ajouté les propriétés mécaniques du matériau du fixture dans le logiciel CATIA, nous avons appliqué le chargement ou les efforts récupérés des essais pratiques. La figure 3.8 montre le dépassement causé sur le matériau usiné et la fixture après avoir appliqué la charge.

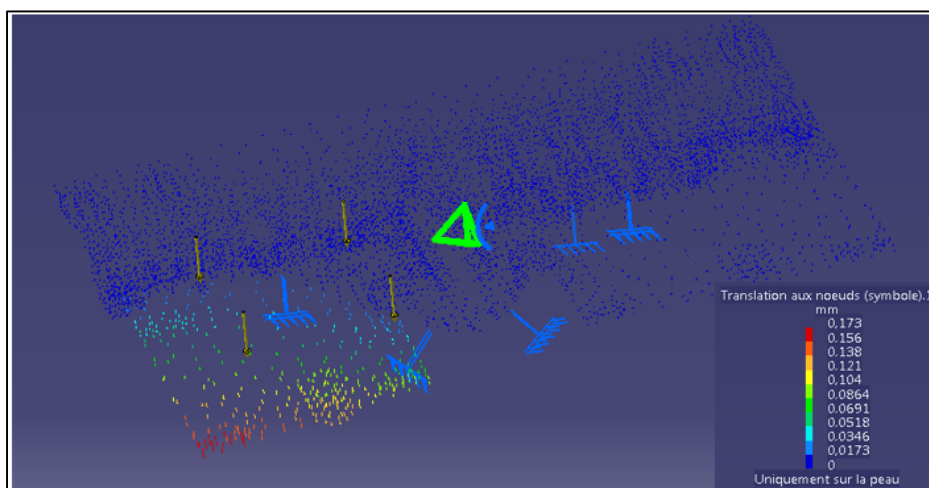


Figure 3-8 : Simuler les contraintes de « Von Mises »

### 3.6.6 Gamme de fabrication

La gamme de fabrication est un outil important dans le domaine industriel. Elle permet d'avoir une idée claire sur le nombre de phases à appliquer, la géométrie d'outil exigé par les contraintes dimensionnelles et géométriques de diplexeur, ainsi que les fixtures nécessaires pour prendre en place et maintenir la pièce en position, pour bien bâtir ce dernier de la manière la plus performante. Elle nous permet également de contrôler l'interaction entre les différents paramètres mentionnés ci-dessus, alors notre processus de fabrication soit plus flexible pour les changements d'idée, de stratégie et des outils. Dans l'objectif de minimiser les erreurs et les fautes, nous avons appliqué cette procédure sur notre produit, ce qui nous a aidés à optimiser les nombres des phases, des opérations et le nombre d'outils, par conséquent le coût de fabrication, en assurant toujours la qualité. On revanche la gamme de fabrication nécessite des paramètres de coupes bien définies et qu'on les a déterminés après avoir appliqué des essais. En plus l'application de ce protocole nous permet de planifier le temps d'exécution de chaque étape et donc on détermine le temps nécessaire pour fabriquer une série d'objets.

La gamme qu'on a réalisée indique pour chaque opération, une description précise de la tâche à faire, le temps d'exécution, ainsi que les outils et les matériaux nécessaires. Nous avons décrit chaque étape (opération, phase, séquence) :

- Poste de travail, la machine utilisée, nombre d'axes et la puissance ;
- Nombre d'opérations nécessaires ;
- Matériaux bruts et outils de coupes ;
- Contrôle et commande, la programmation du code G pour la machine d'outil.

La conception de la gamme de fabrication nous a offert nombreux avantages :

- La prévision des problèmes et des difficultés ;
- La réduction du temps des opérations ;
- Optimisation du matériel et de l'outillage ;
- La réduction du coût dans le cas de production.

Dans le cadre de notre projet, la gamme de fabrication est un outil indispensable pour déterminer les paramètres, les procédés, les outils ainsi que la chronologie optimale sur les aspects les plus pertinents du nôtre produit.





## CHAPITRE 4

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 4.1 Introduction

Une surface usinée n'est pas toujours une surface parfaitement lisse qui respecte exactement le dessin technique, ça dépend généralement des méthodes et de types d'usinages, des matériaux et des éléments d'alliages, des outils de coupe et leurs revêtements. On peut observer des défauts géométriques avec différents degrés, ces défauts engendrent surement un impact négatif sur la fonctionnalité de la pièce quant à sa résistance sous différentes contraintes.

#### 4.2 Étude de l'état de surface

##### 4.2.1 Paramètres de rugosité de surface

Dans cette étude et dans le but de quantifier la qualité de l'état de surface, nous avons choisi d'étudier les paramètres de rugosité surfacique ce qui nous permet d'avoir une précision au niveau des résultats. La profondeur de coupe axiale et radiale a été maintenue constante à 0.7874 mm et 0.3175 mm respectivement. La surface composite usinée a été observée avec un microscope laser (OLYMPUS OLS4100, LEXT). Le microscope applique plusieurs mesures sur la surface concernée, sous forme de texture pour générer une valeur moyenne sur une surface d'un millimètre carré. Les paramètres et les réglages que le microscope a été programmé avec, pour mesurer la rugosité, ont été tirés de travail (Aidibe et al., 2016).

Les paramètres de rugosité incluent les paramètres physiques et les paramètres arithmétiques qui ont mesurés sont définies ci-dessous :

- **Sa** : Rugosité moyenne surfacique arithmétique ;
- **Sq** : Rugosité moyenne quadratique de la surface ;
- **Sv** : Profondeur maximale des vallées ;
- **Sz** : Hauteur maximale du profil ;

- **Sp** : Hauteur maximale des pics ;
- **Ssk** : Asymétrie du profil ;
- **Sku** : Aplatissement du profil.

Le tableau ci-dessous représente les propriétés mécaniques et géométriques de l'outil utilisé dans cette partie de l'étude :

Tableau 4-1 : Caractéristiques de l'outil utiliser pour les essais

	Outils	T3 (32415-C4)
<b>Propriétés géométriques</b>	Diamètre de coupe	3,175 mm
	Rayon de bec	0,381 mm
	Longueur de coupe	12,7 mm
	Profondeur de passe radiale	0,79375 mm
	Profondeur de passe axiale	9,525 mm
	Nombre de dents	4
<b>Propriétés de revêtement</b>	Revêtement / Substrat	Diamant amorphe
	Structure	Uni-couche
	Dureté	78-88 GPa
	Coefficient de frottement	0,1
	Épaisseur de revêtement	0,5-2,5 microns
	Température de travail Max.	750°F

#### 4.2.2 Profils de rugosité de surface

Dans un premier temps, nous allons étudier les effets principaux des 3 facteurs, à savoir le matériau, la vitesse de coupe et l'avance par dent.

Les effets principaux sont directement influencés par les paramètres d'usinage. Les figures 4.1 et 4.2 présentent deux exemples de profils de rugosité surfacique de deux échantillons usinés avec les conditions de coupe extrêmes pour le matériau MS43, et les figures 4.3 et 4.4 pour l'alliage d'aluminium Al6061-T6, en utilisant l'outil de diamètre 3.175mm.

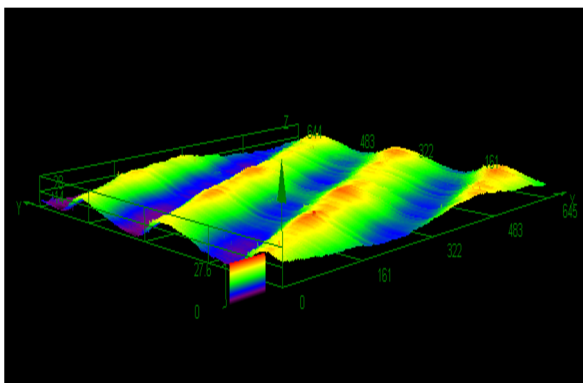


Figure 4-1 : Rugosités de surface  
 $V_c = 137,16 \text{ mm/min}$ ,  $F_z = 0,0254 \text{ mm/dent}$

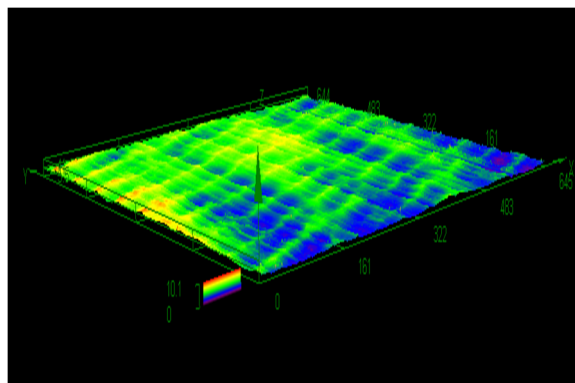


Figure 4-2 : Rugosité de surface  
 $V_c = 76,2 \text{ mm/min}$ ,  $F_z = 0,02032 \text{ mm/dent}$

Les mesures de rugosité et l'analyse des dommages de surface ont été réalisées sur la pièce usinée. La distribution d'amplitude des paramètres de rugosité de surface 2D a été décrite par la rugosité de surface arithmétique ( $S_a$ ). Dans le sens du déplacement de l'outil et dans la direction axiale, les profils 2D ont été réalisés pour mesurer ( $S_a$ ) pour tous les échantillons avec les différents paramètres de coupe selon le plant d'expérience. Une analyse quantitative a été développée pour quantifier l'effet des conditions de coupe sur la topographie de surface. Les figures 4.1 et 4.3 illustrent des ondulations sur la surface, de plus haute vitesse de coupe  $137,16 \text{ mm/min}$  et avance par dent de  $0,0254 \text{ mm/dent}$ , pour les matériaux MS43 et Al6061-T6 respectivement. Cependant, les figure 4.2 et 4.4 montrent des pics de rugosité sans ondulations avec la vitesse de coupe inférieure à  $76,2 \text{ mm/min}$  et avance par dent égale à  $0,02032 \text{ mm/dent}$  pour le MS43 et Al6061-T6 respectivement. Donc en analysant les données entre ces deux valeurs de vitesse de coupe et d'avance nous pouvons déterminer les paramètres de coupe optimaux pour le meilleur état de surface.

### 4.2.3 Influence de paramètres de coupe sur la rugosité de surface

Dans le même sens, les figures 4.3 et 4.4 illustrent l'effet des conditions de coupe sur l'état de surface. Les valeurs de rugosité de surface sont la moyenne de plusieurs mesures réalisées à l'aide du microscope.

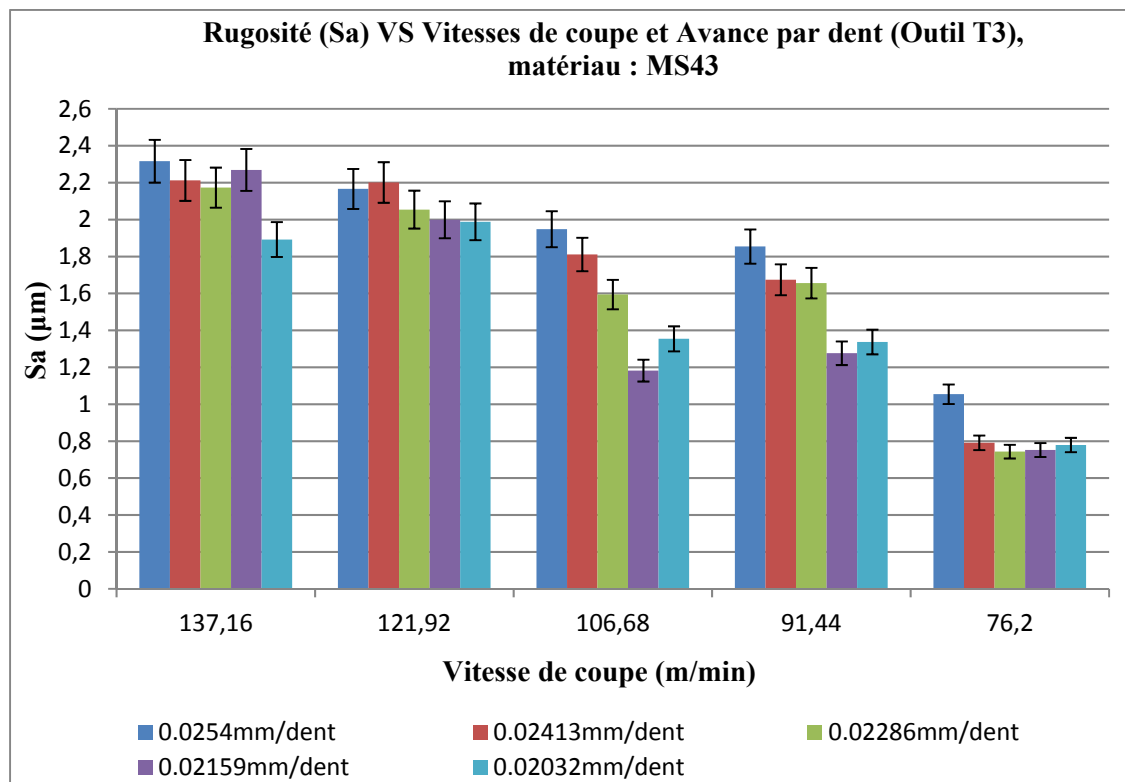


Figure 4-3 : L'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface lors de l'usinage de MS43

La figure 4.3 montre que la moyenne de la rugosité de la surface arithmétique est sensible à la variation de la vitesse de coupe et à l'avance par dent. La rugosité varie entre 2,316 et 0,743  $\mu\text{m}$ , les hauteurs ne sont pas réparties sur une ligne moyenne, mais sur une courbe croissante ou décroissante. Par conséquent, les profils de surface étaient aléatoires, mais en même temps présentaient une surface très rugueuse pour les deux vitesses de coupe de 137,16 et 121,92 mm/min.

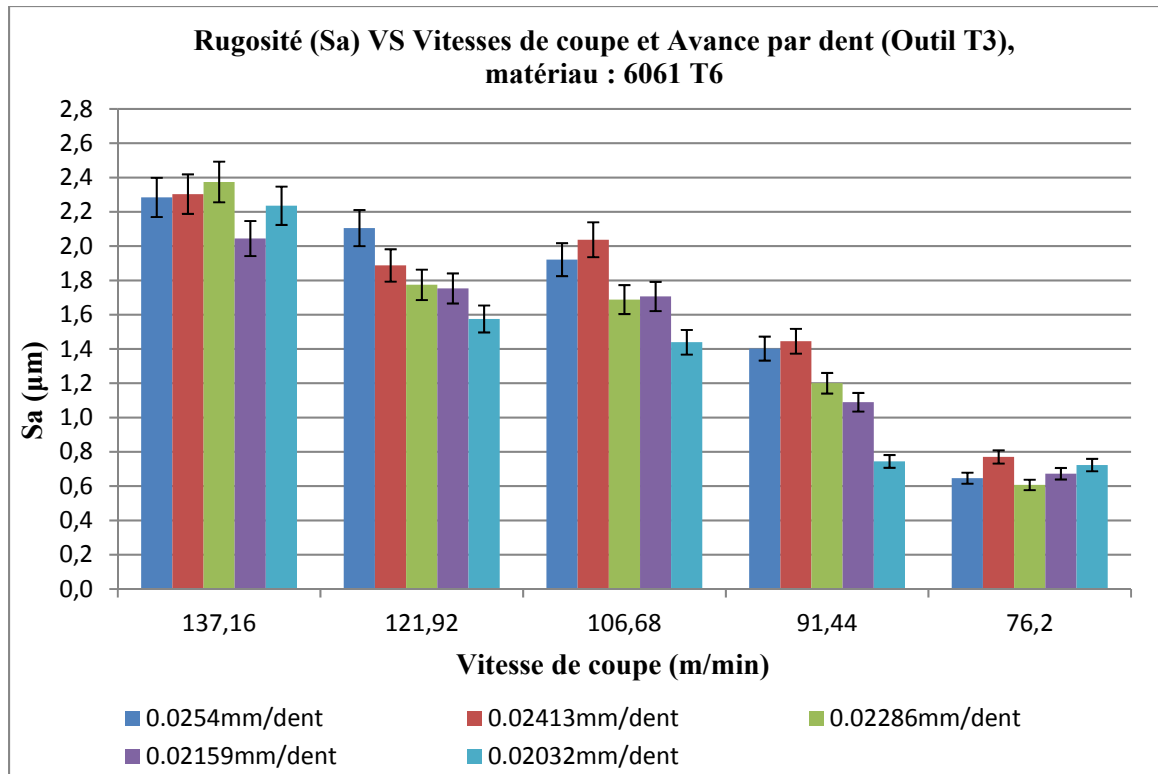


Figure 4-4 : L'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface lors de l'usinage de 6061-T6

Nous avons appliqué le même principe sur l'alliage d'aluminium Al6061-T6 figure 4.4, la rugosité obtenue est meilleure que celle de MS43. La rugosité diminue proportionnellement à la diminution des paramètres de coupes. Elle varie entre 2,374 et 0,607  $\mu\text{m}$ , les hauteurs ne sont pas réparties sur une ligne moyenne, mais sur une courbe croissante ou décroissante. Par conséquent, les profils de surface présentaient une surface très rugueuse pour les trois vitesses de coupe de 137,16 ; 121,92 et 106,68 mm/min.

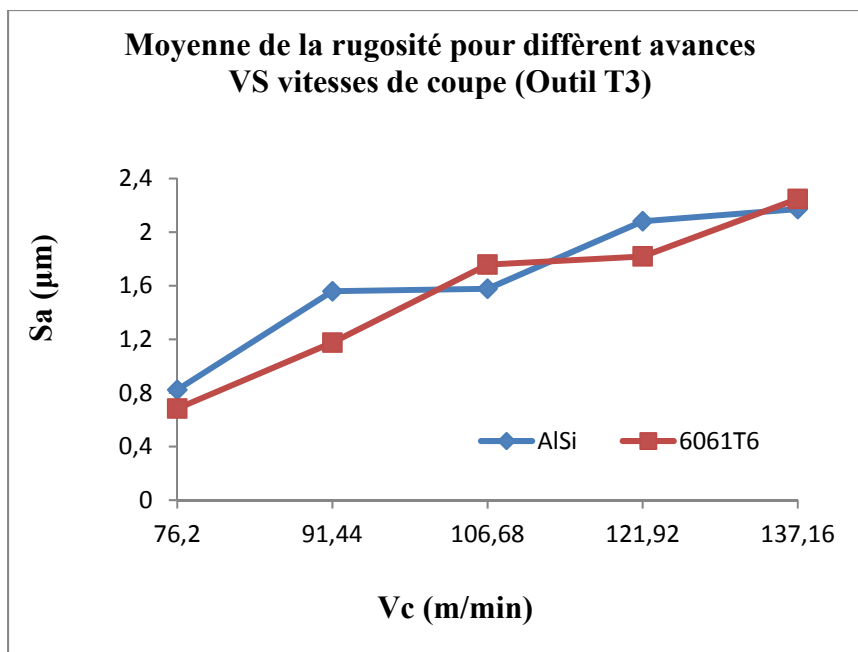


Figure 4-5 : L'influence de vitesse de coupe  $V_c$  sur la rugosité pour les deux matériaux MS43 et 6061 T6

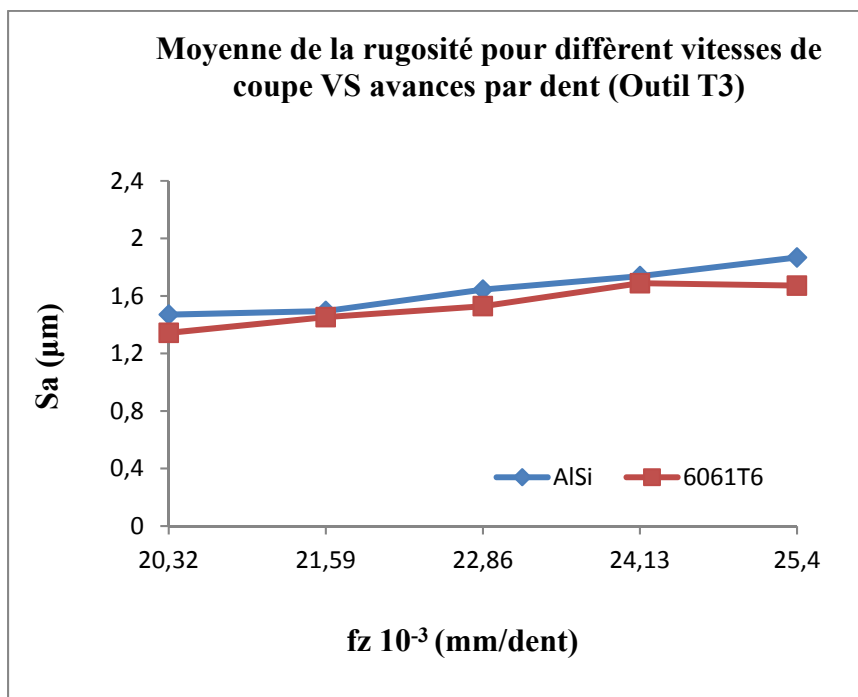


Figure 4-6 : L'influence de vitesse d'avance  $F_z$  sur la rugosité pour les deux matériaux MS43 et 6061 T6

Les figures ci-dessus montrent l'analyse de rugosité moyenne pour une valeur de vitesse de coupe unique et des avances par dents différentes. La courbe de rugosité moyenne pour une seule valeur d'avance et différentes vitesses de coupe est illustrée à la figure 4.5. Il est à noter que la rugosité est significativement élevée pour les vitesses de coupe de 137 m/min, 16 m/min et 121,92 m/min, puis la tendance à baisser à partir de 106,68 mm/min. La figure 4.6 montre que la rugosité diminue toujours en fonction de la diminution des valeurs de l'avance par dent. Cependant, les deux courbes ci-dessus montrent que l'effet de la vitesse de coupe est plus important sur l'intégrité de la surface que les vitesses d'avance. Par contre pour l'Al6061-T6 et malgré la différence significative des éléments d'additions, caractéristiques mécaniques et la microstructure, nous ne remarquons pas une différence majeure au niveau des effets de la variation de vitesse de coupe et l'avance par dent. La meilleure rugosité enregistrée est 0,743 micromètre pour le Al6061-T6 avec  $20,32 \cdot 10^{-3}$  mm/dent et 76,2 mm/min, et pour le MS43 nous avons enregistré une rugosité de 0,607 micromètre avec  $20,32 \cdot 10^{-3}$  mm/dent et 76,2 mm/min comme paramètres de coupes. Nous remarquons que l'influence de matériau est légère. Dans cette partie, nous allons visualiser l'importance de l'influence de différentes vitesses de coupe et d'avance par dent sur la réponse état de surface, à travers une analyse des résultats qui permettent de classer les facteurs et leurs interactions selon leur degré de contribution dans les réponses, et ce qui nous permette de sélectionner les paramètres de coupes qui génèrent le minimum des défauts au niveau de la surface usinée.

Dans la figure 4.5, à l'intersection 2.2 micromètres de rugosité et 137,16 m/min, la valeur de la rugosité est la moyenne des différentes mesures appliquées sur les échantillons qui ont la même vitesse de coupe et différentes avances par dent selon le plan d'expérience. Nous remarquons bien, d'après ce graphique, qu'en fixant l'avance et en variant la vitesse de coupe la rugosité diminue de 72 %, par contre à la figure 4.6 nous avons appliqué le même principe en faisant une interchangeabilité entre la vitesse de coupe et l'avance par dent. Nous remarquons que la rugosité diminue d'environ 33 %. Cette différence montre l'effet significatif de la vitesse de coupe sur le fini de surface en comparaison avec l'avance par dent. En effet on peut conclure que la vitesse de coupe est le facteur le plus influent, plus elle diminue plus la rugosité diminue. En deuxième position, nous trouvons que l'avance par dent est

proportionnelle aussi à la rugosité, mais toujours avec un effet moindre que la vitesse de coupe, sachant que la variation des facteurs a été fixée à 5 % de la valeur initiale.

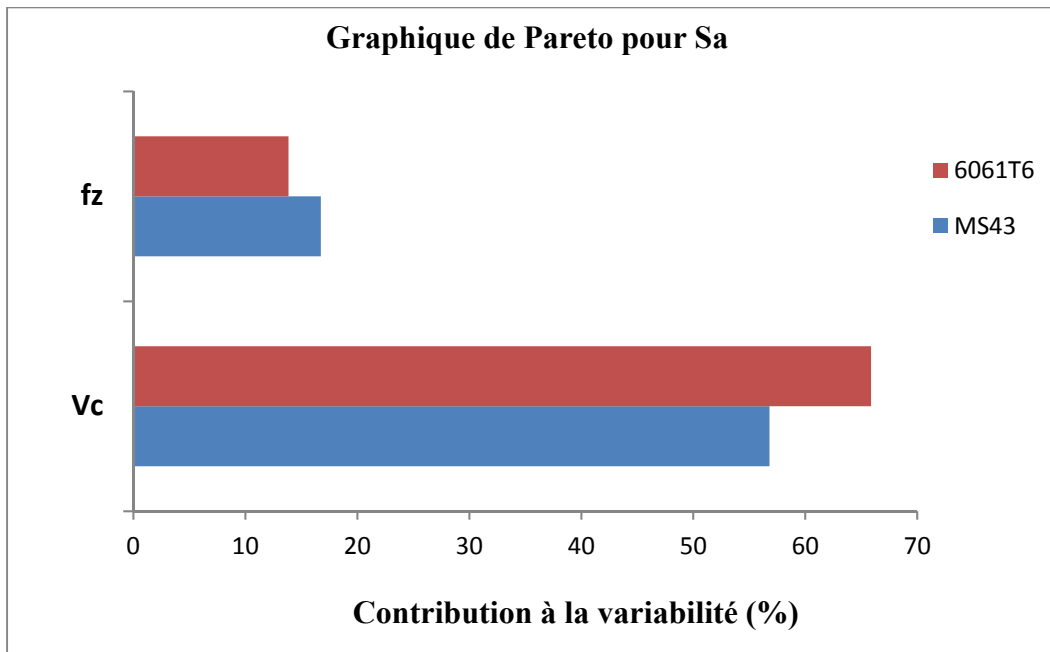


Figure 4-7 : Comparaison de l'influence de paramètres de coupe entre les deux matériaux MS43 et 6061-T6

En plus, une analyse de graphique de Pareto nous permet de visualiser l'influence des facteurs sur les réponses, donc nous pourrions classer les facteurs et leurs interactions selon leur degré de contribution dans les réponses. Nous remarquons bien, d'après ce graphique de Pareto figure 4.7, l'avance par dent à un effet négligeable par rapport à la vitesse de coupe sur l'état de surface. Ce qui nous permet de considérer la vitesse de coupe comme facteur dominant. Nous constatons aussi que les contributions de la vitesse de coupe et l'avance par dent sont totalement contraires selon le matériau, ceci est fortement probable dû à la flexion de l'outil en augmentant la vitesse d'avance pour un matériau dur comme MS43.

#### 4.2.4 Paramètres d'amplitude de surface

La plupart des paramètres de profil définis dans (ISO4287) ont une expression mathématique qui peut facilement convertir les profils 2D en 3D. Par exemple, Sq est simplement une extension d'un plan de l'équation de Rq qui est défini pour une ligne :



$$R_q = \sqrt{\frac{1}{lb} \int_{lb} Z^2(x) dx} \quad S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \int_A Z^2(x, y) dx dy} \quad (4.1)$$

**Sa, Sq, Sv, Sz, Ssk, Sku, Sp** peuvent être définis directement de la même manière avec une simple extrapolation au plan. Les équations de paramètres utilisent les intégrales au lieu des sommes parce qu'elles représentent la définition d'un cas continu. De toute évidence, les implémentations pratiques utilisent des données discrètes et diverses approximations pour les intégrales.

Dans notre étude et pour aboutir à nos objectifs, nous allons fixer une rugosité maximale de 0,8 micromètre. Nous allons déterminer les paramètres de coupe optimaux pour atteindre cette cible. Le tableau 4.2 ci-dessous présente des facteurs et des réponses qui peuvent être recommandées pour la fabrication des pièces finies. Chacun de ces paramètres de rugosité présente une ou plusieurs des caractéristiques de la surface usinée.

Tableau 4-2 : Résultat des différents paramètres de rugosité et de coupe

	Paramètres	Pour une rugosité maximale de 0,8 micromètre		Rugosité minimale enregistrée	
		MS43	Al6061-T6	MS43	Al6061-T6
<b>Réponses</b>	Sa	0,791	0,744	0,743	0,607
	Sq	0,964	0,934	1,183	0,753
	Sv	7,391	4,071	5,509	3,793
	Sz	17,377	9,06	12,181	8,817
	Ssk	0,509	0,263	0,228	0,194
	Sku	11,468	2,989	3,129	2,818
	Sp	9,986	4,989	6,672	5,023
<b>Facteurs</b>	Vc (m/min)	76,2	91,44	76,2	91,44
	Fz (mm/dent)	24,13 10 <sup>-3</sup>	20,32 10 <sup>-3</sup>	22,86 10 <sup>-3</sup>	22,86 10 <sup>-3</sup>

La figure 4.8 ci-dessous montre la variation des différents paramètres d'amplitude ou de rugosité pour les paramètres de coupe mentionnés dans le tableau ci-dessus. Nous remarquons d'abord que la rugosité arithmétique est très similaire pour les deux matériaux, bien que la rugosité de MS43 soit légèrement élevée par rapport à l'Al6061-T6, et c'est tout à fait logique à cause des grains durs de silicium. Comme il montre le travail de (Andrewes, Feng et Lau, 2000b). En plus sous l'effet des grains solides de silicium, l'indicateur Sp montre des pics 30

% plus élevés pour le MS43. Même chose pour la hauteur maximale du profil Sz, lui aussi montre un dépassement de 30 % en hauteur de MS43 sur Al6061-T6 donc l'effet de l'addition de silicium dans l'alliage.

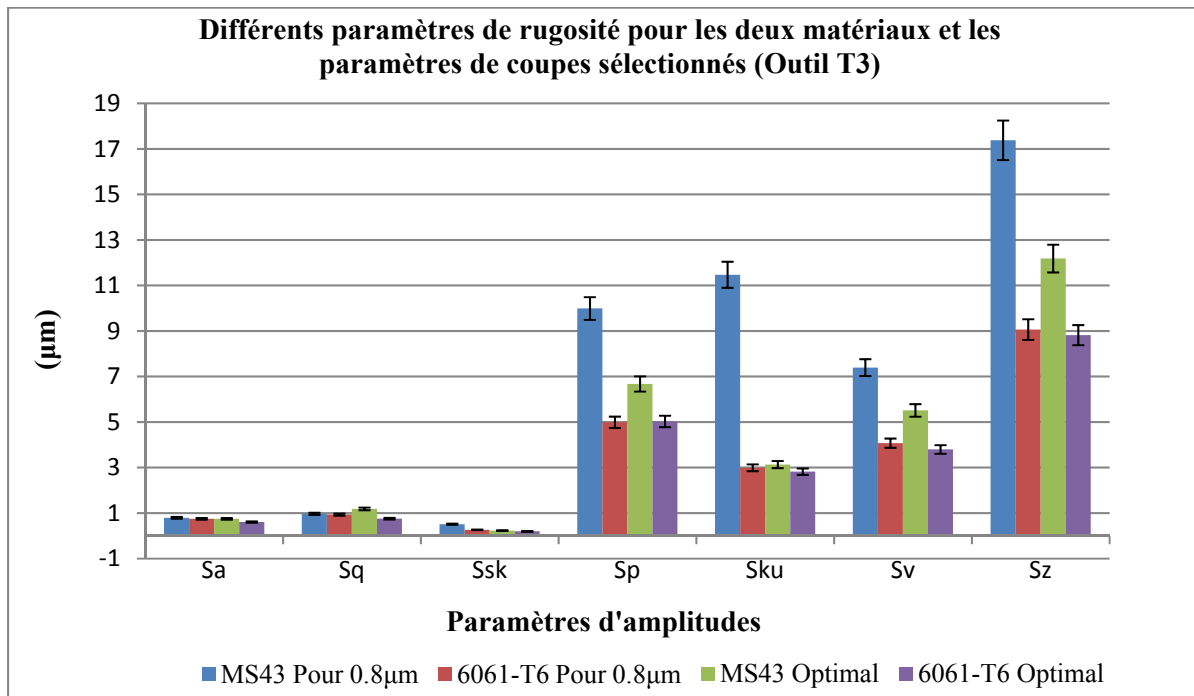


Figure 4-8 : Comparaison de paramètres de rugosité de deux matériaux

#### 4.2.5 Influence de diamètres d'outils sur la rugosité de surface

La même stratégie, paramètre et plan d'expérience a été appliqué sur les deux matériaux MS43 et Al6061-T6 où une variation des diamètres d'outils a été effectuée et nous avons gardé la profondeur de passe axiale et radiale selon la recommandation du fournisseur d'outil. Le tableau 4.3 présente les caractéristiques des quatre outils utilisés dans cette partie de la recherche.

Tableau 4-3 : Caractéristiques des outils utilisés

Outils (Harvey)	T1	T2	T4	T5
Diamètre de coupe (mm)	1,19	2,28	4,75	6,35
Rayon du coin (mm)	0,38	0,38	0,38	0,38
Profondeur de passe radiale (mm)	0,11	0,22	0,47	0,63
Profondeur de passe axiale (mm)	3,58	6,85	12,70	12,70
Vc Vitesse de coupe m/min	91,44	137,16	137,16	137,16

	76,20	121,92	121,92	121,92
	60,96	106,68	106,68	106,68
	45,72	91,44	91,44	91,44
	30,48	76,20	76,20	76,20
<b>Fz Avance par dent (mm/dent)</b>	0,0169	0,0188	0,0376	0,0503
	0,0162	0,0178	0,0368	0,0495
	0,0149	0,0165	0,0356	0,0483
	0,0136	0,0152	0,0343	0,0470
	0,0124	0,0140	0,0330	0,0457

- **Effet du matériau**

Dans un premier temps, la présentation des résultats réels s'avère commode pour donner immédiatement un aperçu sur les valeurs de comparaison des effets, les figures suivantes représentent les résultats pour les différents paramètres de coupe.

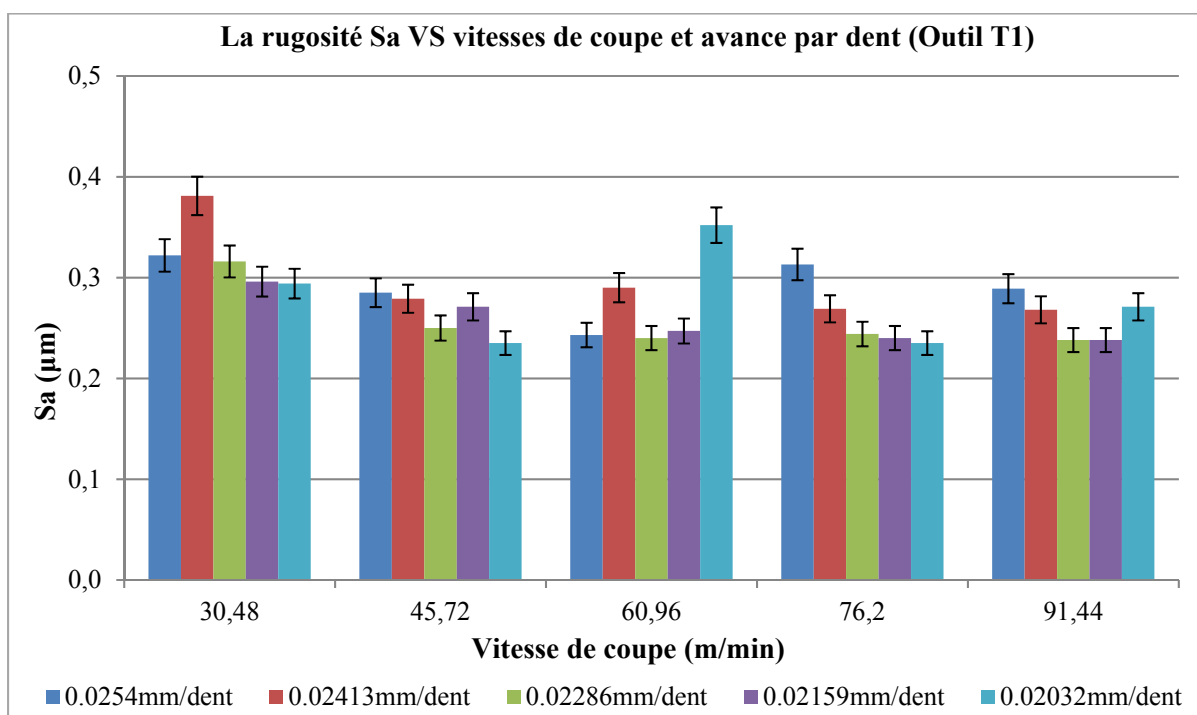


Figure 4-9 : Outil T1, effet de la vitesse de coupe sur la rugosité arithmétique surfacique Sa

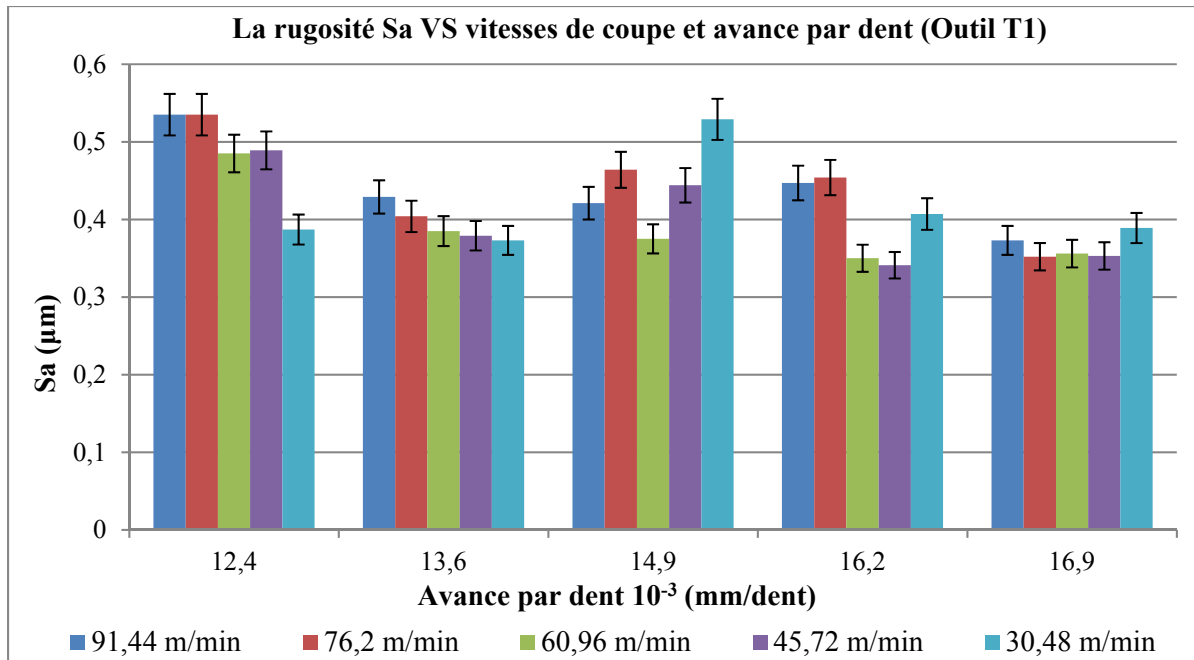


Figure 4-10 : Outil T1, effet de l'avance par dent sur la rugosité arithmétique surfacique  $S_a$

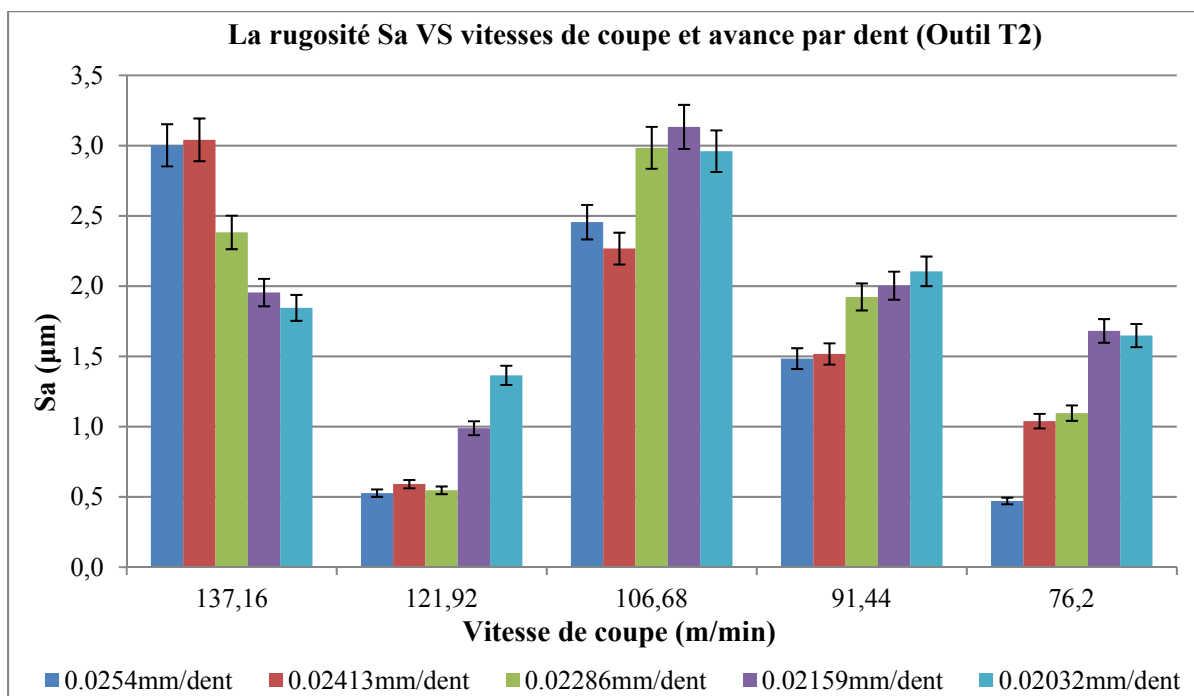


Figure 4-11 : Outil T2, effet de la vitesse de coupe sur la rugosité arithmétique surfacique  $S_a$

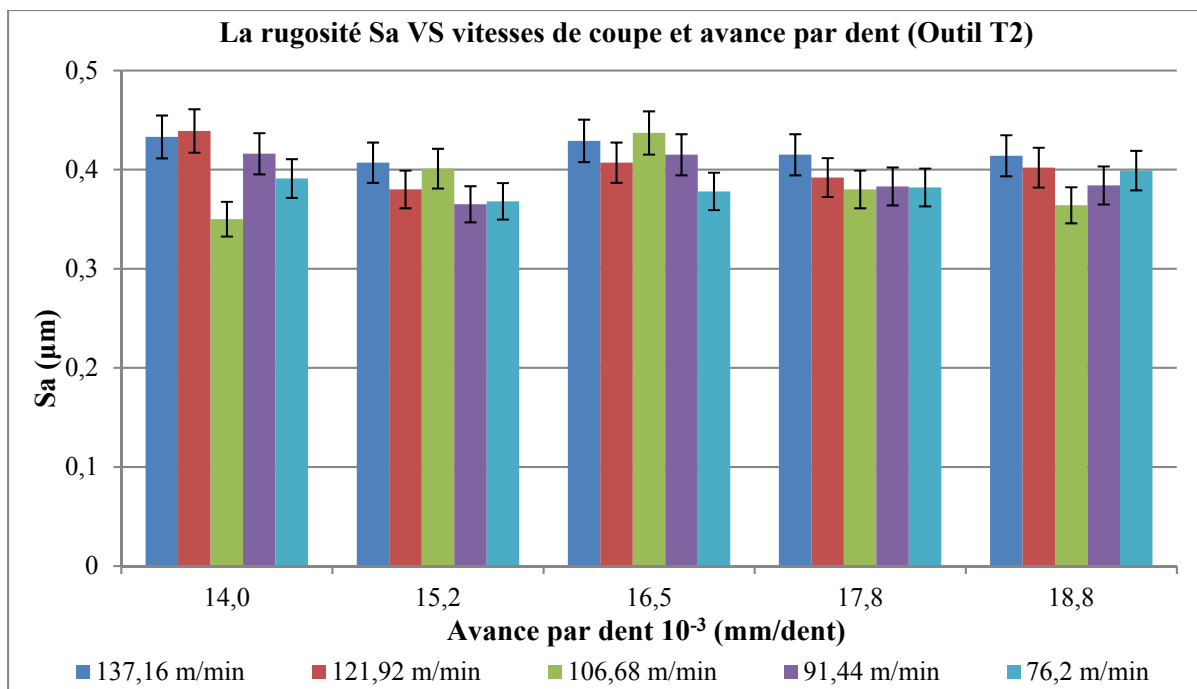


Figure 4-12 : Outil T2, effet de l'avance par dent sur la rugosité arithmétique surfacique  $S_a$

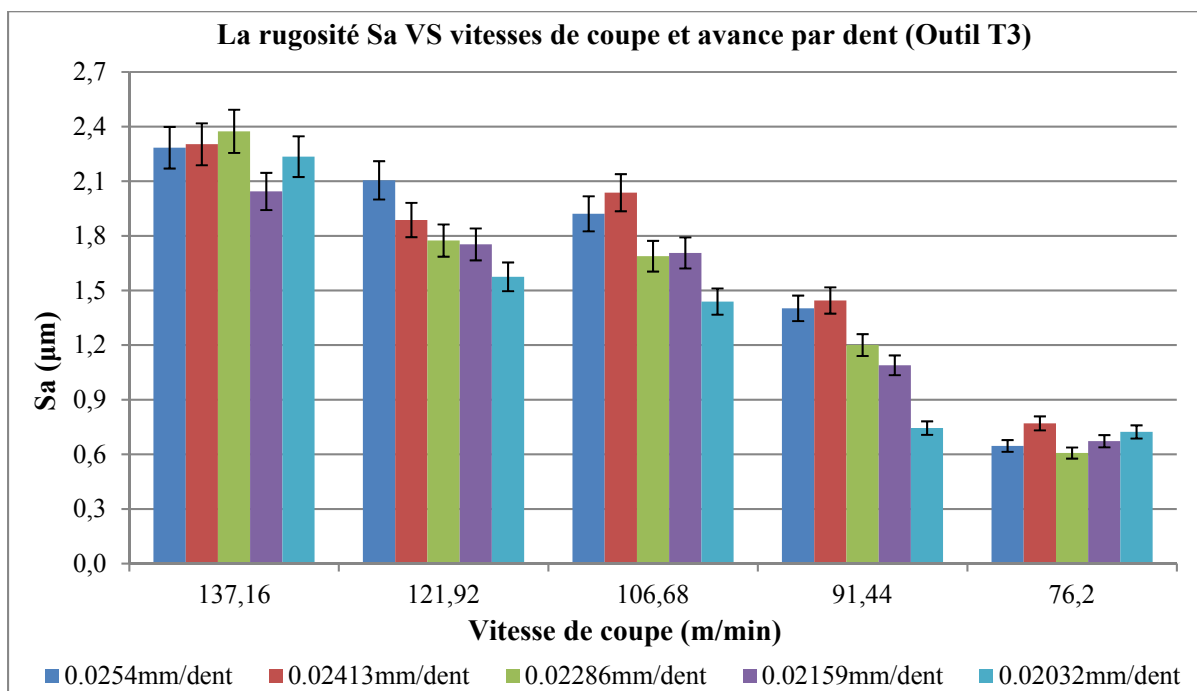


Figure 4-13 : Outil T3, effet de la vitesse de coupe sur la rugosité arithmétique surfacique  $S_a$

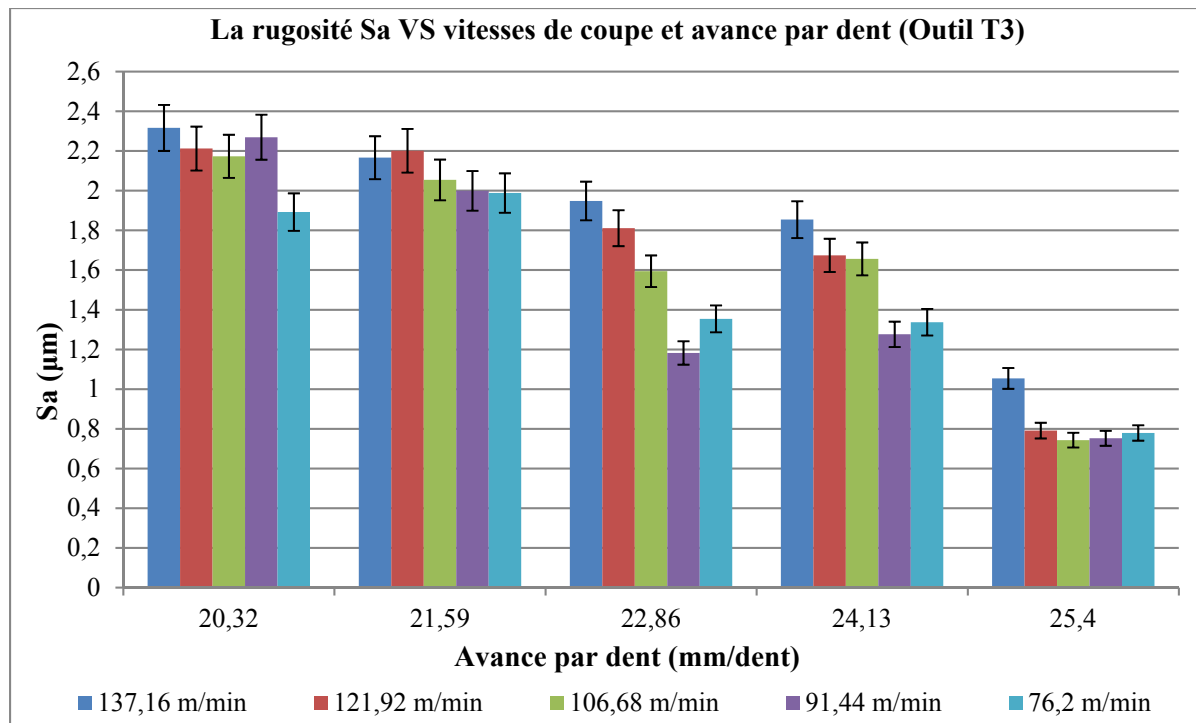


Figure 4-14 : Outil T3, effet de l'avance par dent sur la rugosité arithmétique surfacique  $S_a$

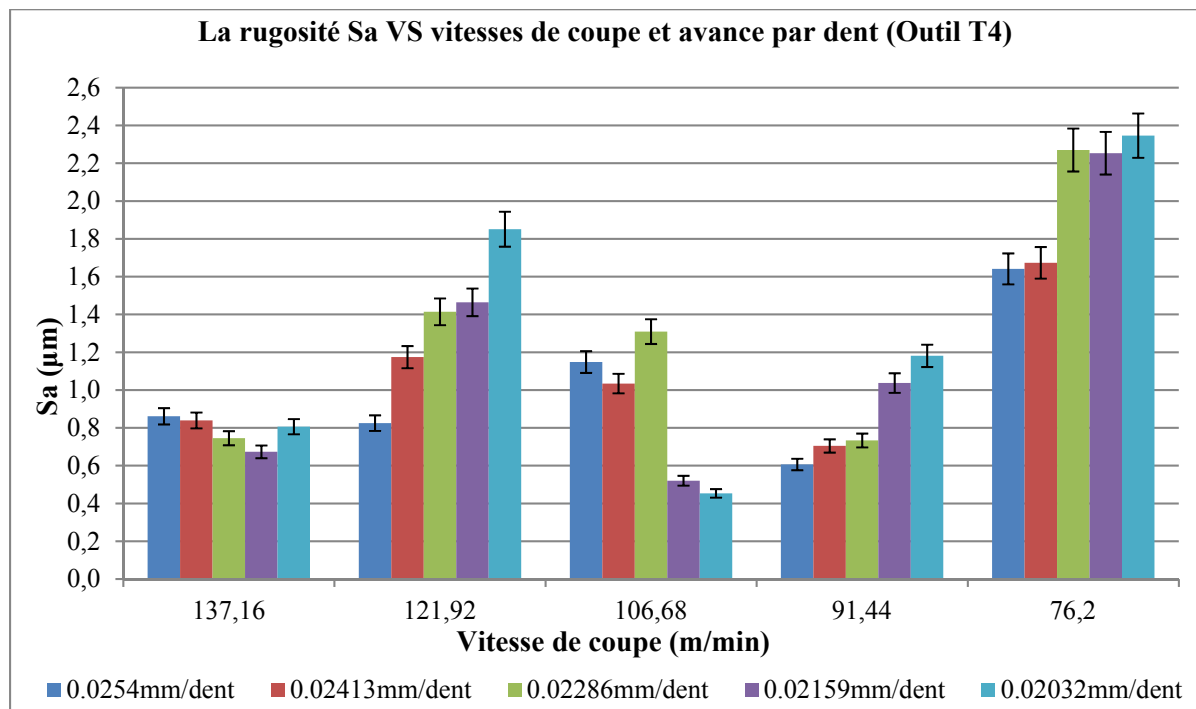


Figure 4-15 : Outil T4, effet de la vitesse de coupe sur la rugosité arithmétique surfacique  $S_a$

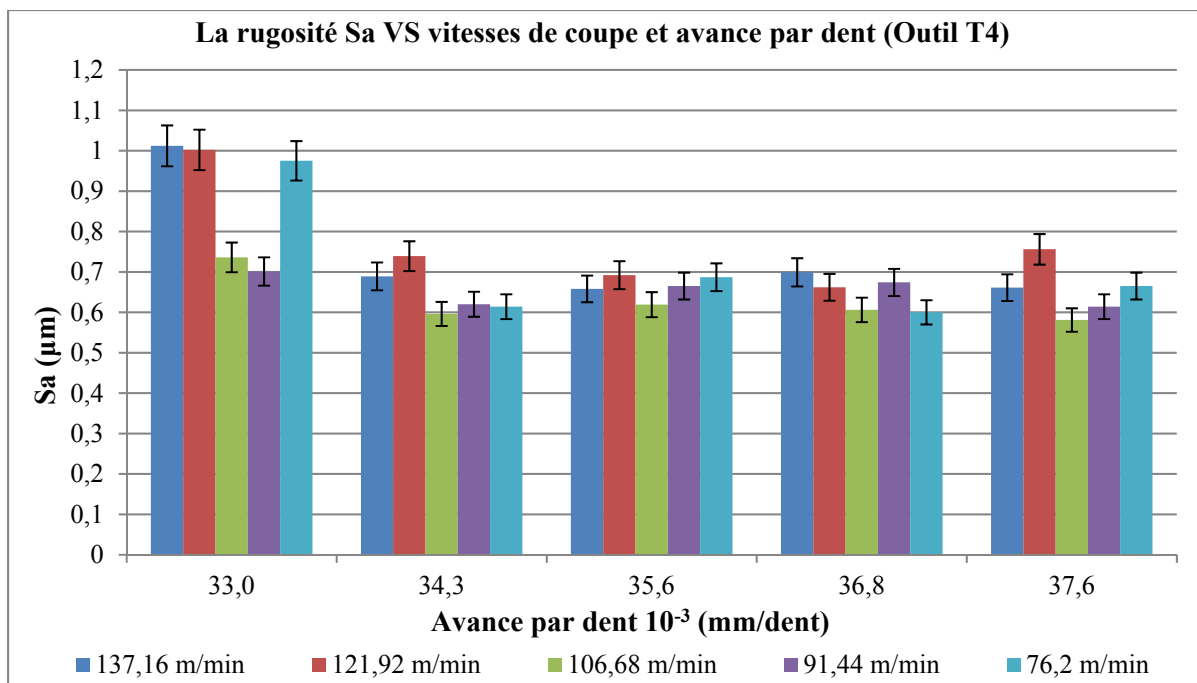


Figure 4-16 : Outil T4, effet de l'avance par dent sur la rugosité arithmétique surfacique  $S_a$

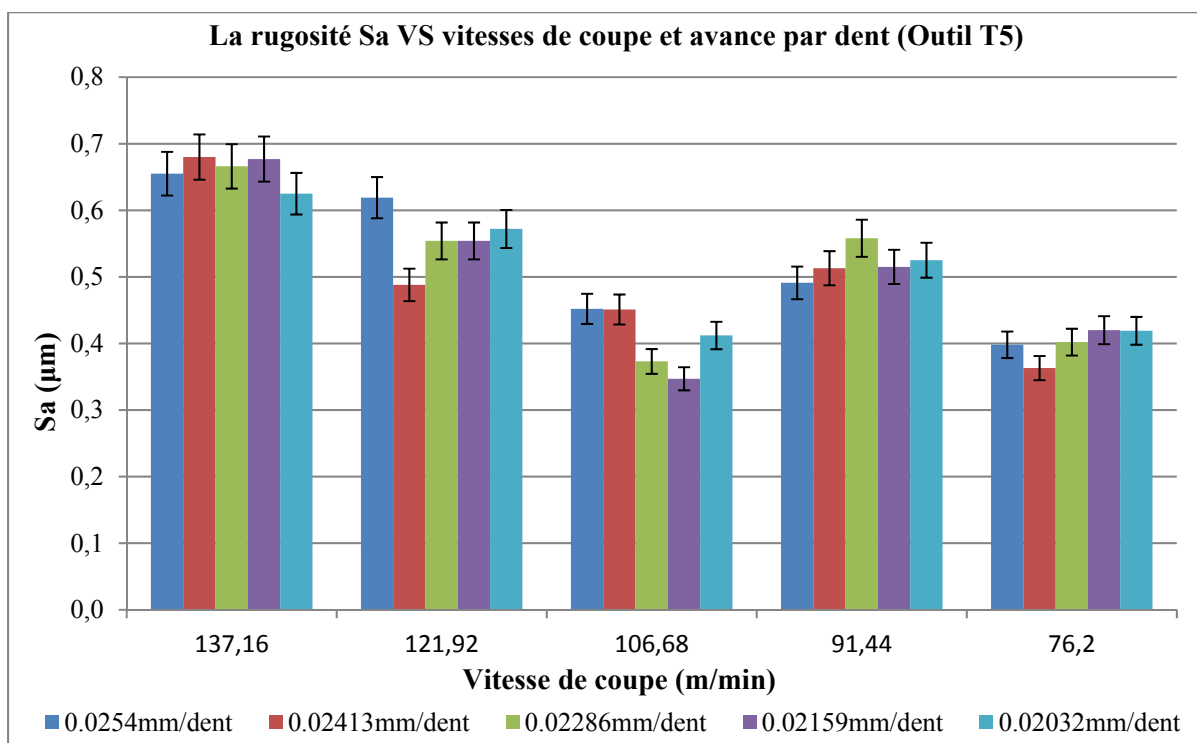


Figure 4-17 : Outil T5, effet de la vitesse de coupe sur la rugosité arithmétique surfacique  $S_a$

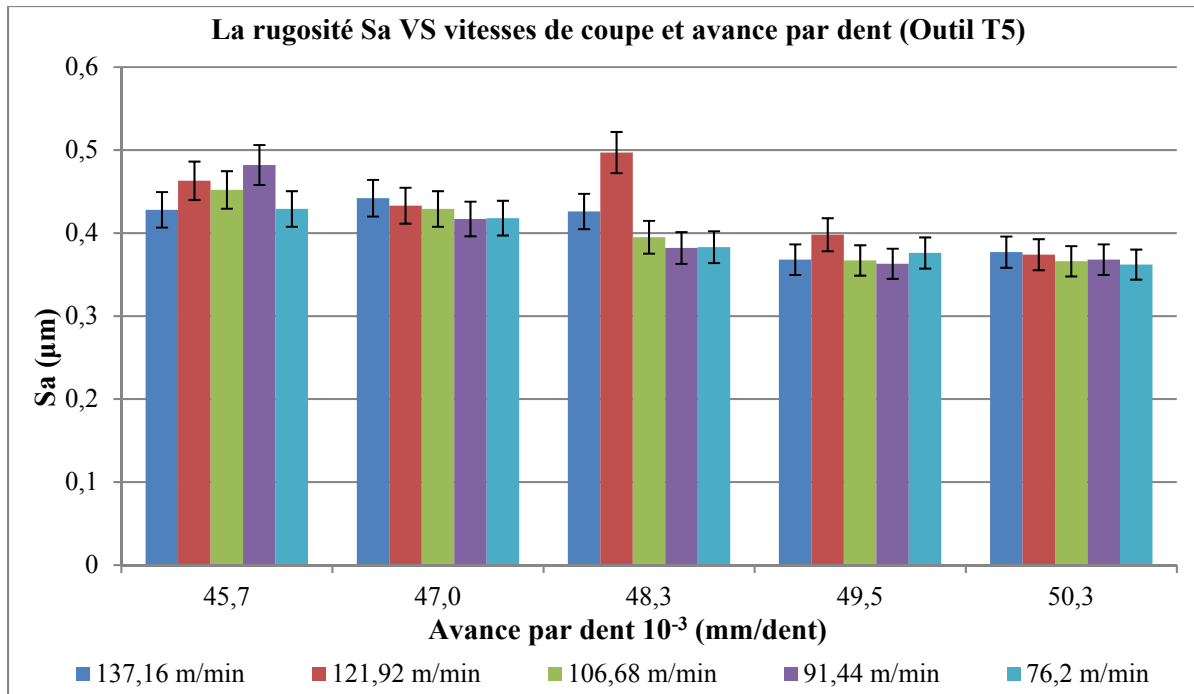


Figure 4-18 : Outil T5, effet de l' avance par dent sur la rugosité arithmétique surfacique  $S_a$



Les figures précédentes montrent que les réponses sont directement influencées par les paramètres d'usinage. Nous constatons d'abord que l'action du diamètre de l'outil, la vitesse de rotation de la broche et la nature du matériau sont très importantes.

Pour le matériau spécifiquement, nous remarquons une grande variation qui est parfois importante et non significatif, ce qui montre l'apparence d'un phénomène physique sur la surface sous l'effet des paramètres de coupe, ce phénomène est fortement probable que ce soit la fusion du matériau, cette partie va être étudié par la suite. Par contre pour le MS43 nous observons une stabilité au niveau de la rugosité. Cependant, en voyant de près les différences dans les graphiques des rugosités, nous constatons que, le MS43 ne représente pas les plus faibles valeurs de la rugosité, mais il présente majoritairement une variation médiocre. Cette variation est due aux non-homogénéités du matériau vu dans le chapitre de caractérisation.

- **Paramètres de coupe**

Afin d'avoir une interprétation complète, il faut tenir compte des interactions qui ne sont pas négligeables. Encore, la présence d'interactions entre les facteurs ne permet pas d'étudier l'influence d'un facteur à partir de son effet principal seul sur une réponse, car lorsque nous changeons son niveau, nous modifions les effets de tous les autres facteurs. Une analyse basée sur les effets principaux des différents types d'émissions et une source d'erreur, d'où l'importance de la considération des interactions lors de l'étude des influences pour aboutir aux interprétations.

Les effets des interactions entre les facteurs sont illustrés dans les figures ci-dessous pour le paramètre  $S_a$  et dans les annexes pour le reste des paramètres de l'analyse. La variation est semblable pour les deux matériaux et les diamètres qui possèdent une influence sur les réponses d'une façon significative et directe. Et en interagissant l'un avec l'autre.

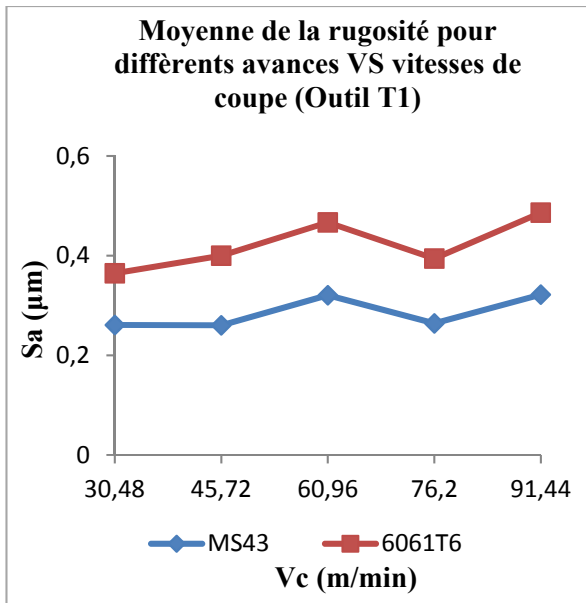


Figure 4-19 : Moyenne de la rugosité pour différentes avances VS vitesse de coupe (Outil T1)

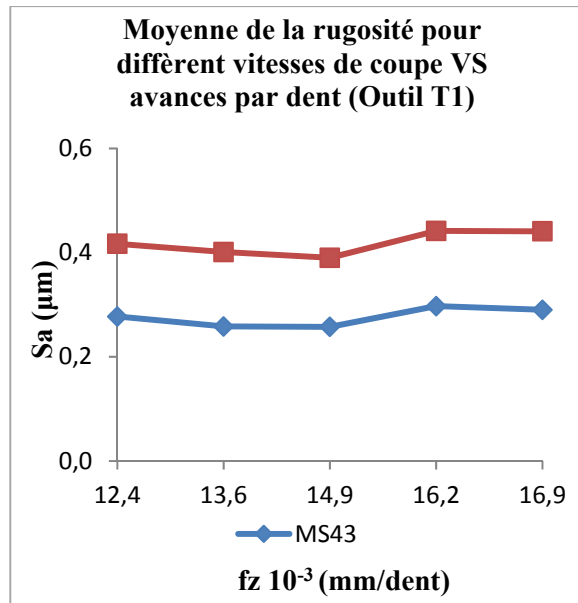


Figure 4-20 : Moyenne de la rugosité pour différentes vitesses de coupe VS avance par dent (Outil T1)

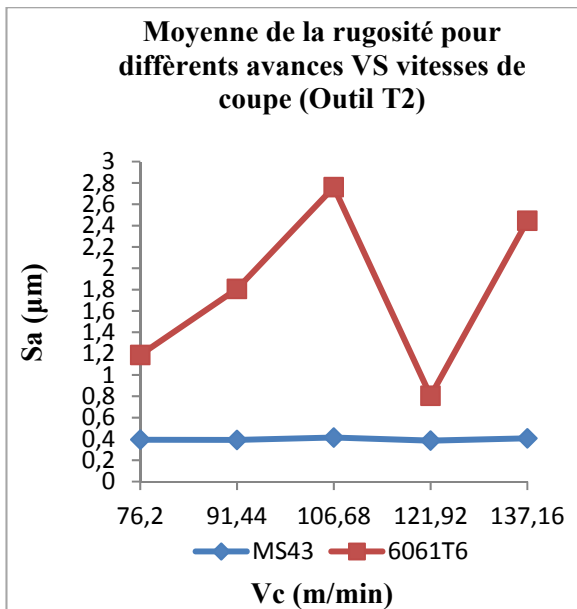


Figure 4-21 : Moyenne de la rugosité pour différentes avances VS vitesse de coupe (Outil T2)

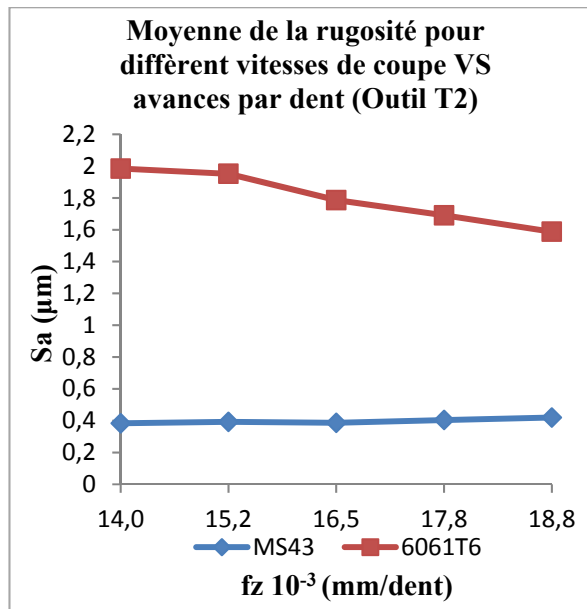


Figure 4-22 : Moyenne de la rugosité pour différentes vitesses de coupe VS avance par dent (Outil T2)

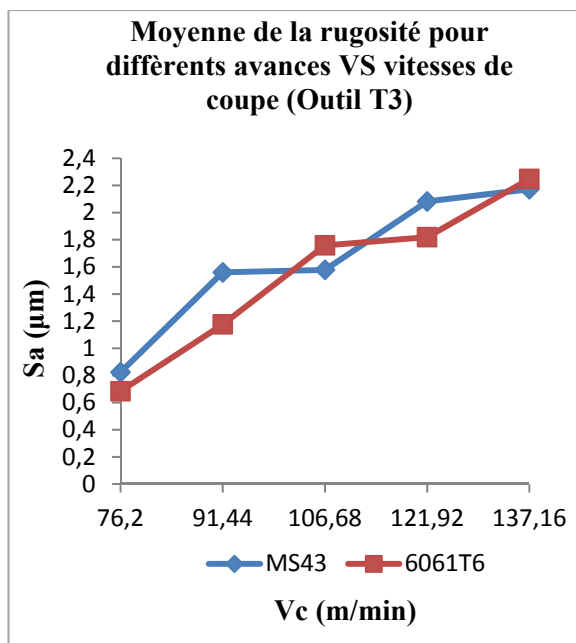


Figure 4-23 : Moyenne de la rugosité pour différentes avances VS vitesse de coupe (Outil T3)

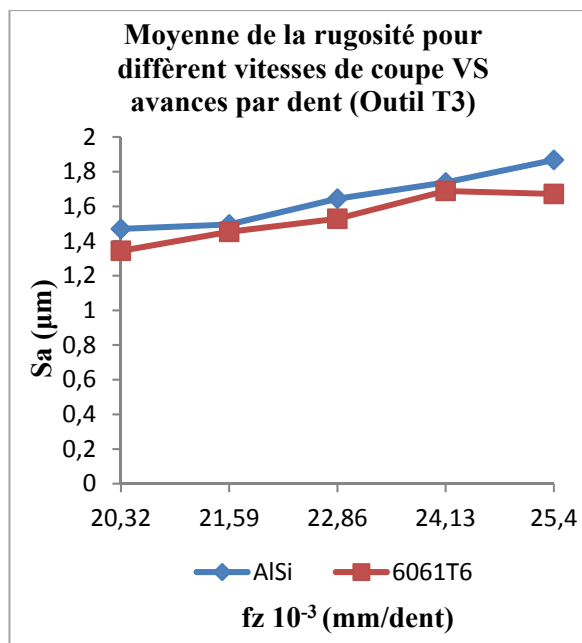


Figure 4-24 : Moyenne de la rugosité pour différentes vitesses de coupe VS avance par dent (Outil T3)

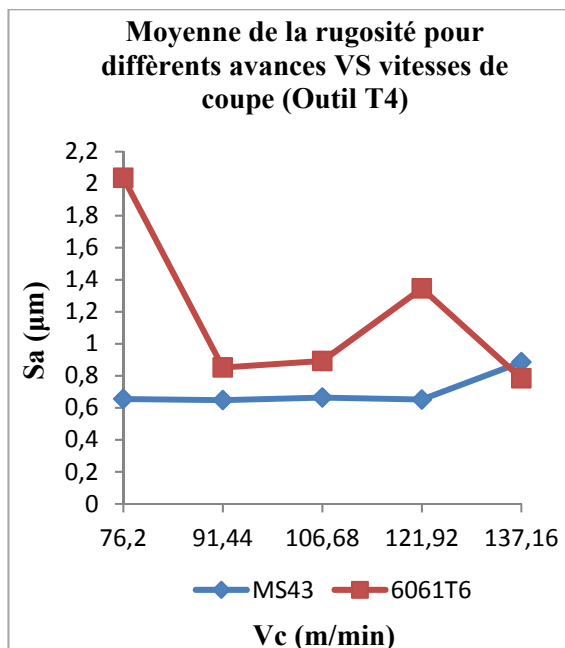


Figure 4-25 : Moyenne de la rugosité pour différentes avances VS vitesse de coupe (Outil T4)

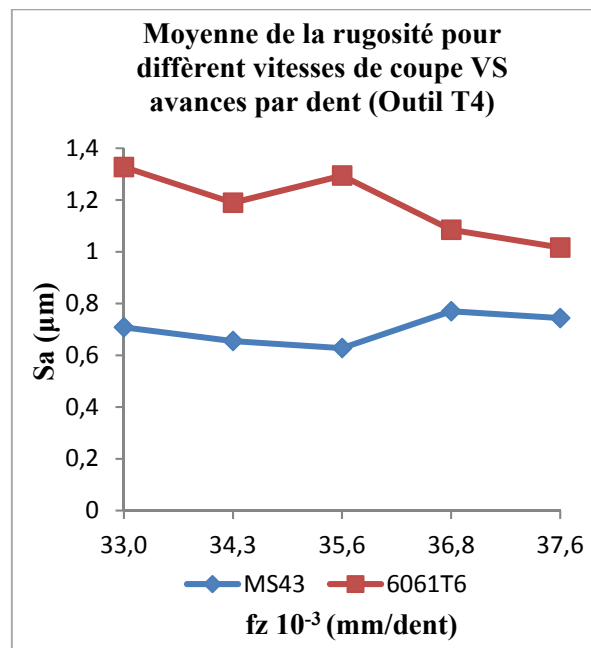


Figure 4-26 : Moyenne de la rugosité pour différentes vitesses de coupe VS avance par dent (Outil T4)

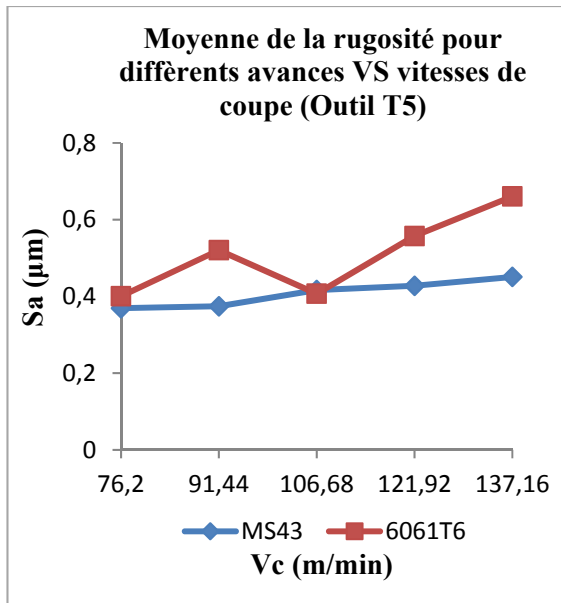


Figure 4-27 : Moyenne de la rugosité pour différentes avances VS vitesse de coupe (Outil T5)

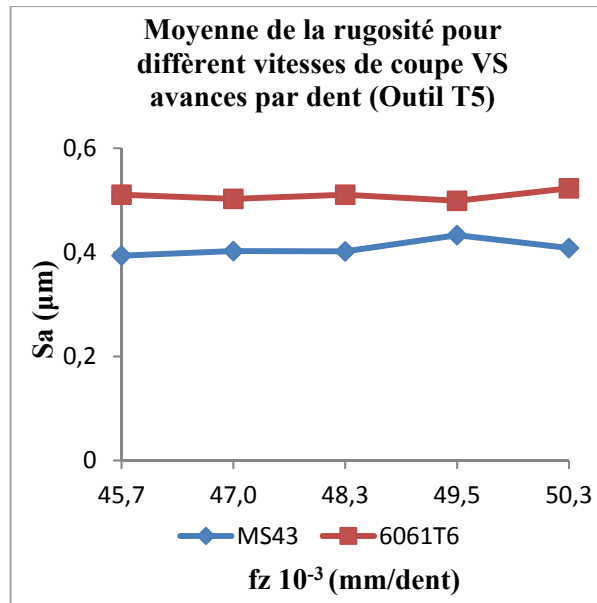


Figure 4-28 : Moyenne de la rugosité pour différentes vitesses de coupe VS avance par dent (Outil T5)

Dans les courbes présentées ci-dessous, nous remarquons l'effet du matériau sur l'état de surface. Plus l'avance par dent augmente, et ce pour les différents niveaux du reste des facteurs, plus la valeur des réponses augmente pour tous les diamètres d'outils. Même chose remarquée pour la vitesse de coupe, en augmentant la vitesse de coupe la rugosité augmente sans exception pour tous les diamètres. Pour ce qui est de la vitesse de rotation de la broche, qui dépend du diamètre de l'outil, pour le MS43, nous observons toujours une pente positive ou nulle avec une variation entre 0,26 et 0,82 micromètre avec la même vitesse de coupe minimale autorisée. Pour l'outil T3 nous avons enregistré la plus grande rugosité, qui varie au fur et à mesure en variant le diamètre d'outil. Par contre pour Al6061-T6 nous n'observons pas une tendance claire ou une continuité au niveau des courbes de rugosité, ce qui montre que l'usinabilité de MS43 est plus améliorée pour cette plage des paramètres d'usinage, et pour cette série des diamètres. Sauf pour le T1, nous avons diminué les vitesses de coupes avec les diamètres d'outil, nous remarquons que la courbe de rugosité d'Al6061-T6 a la même tendance que la courbe de MS43, mais les valeurs sont un peu plus élevées pour tous les paramètres.

### 4.3 Contribution des paramètres de coupe à la variabilité de réponse

L'analyse des graphiques de Pareto, qui permettent de classer les facteurs et leurs interactions selon leur degré de contribution dans les réponses, est le sujet de cette partie. Cette étude nous permet d'avoir une vision sur l'influence des facteurs de l'étude sur les réponses. Les figures suivantes illustrent les graphiques de Pareto de la rugosité arithmétique surfacique en fonction des facteurs significatifs prise en compte dans cette étude. Majoritairement, c'est l'avance par dent et la vitesse de coupe qui sont les facteurs les plus influents. Néanmoins, nous remarquons aussi que le diamètre de l'outil a une influence considérable.

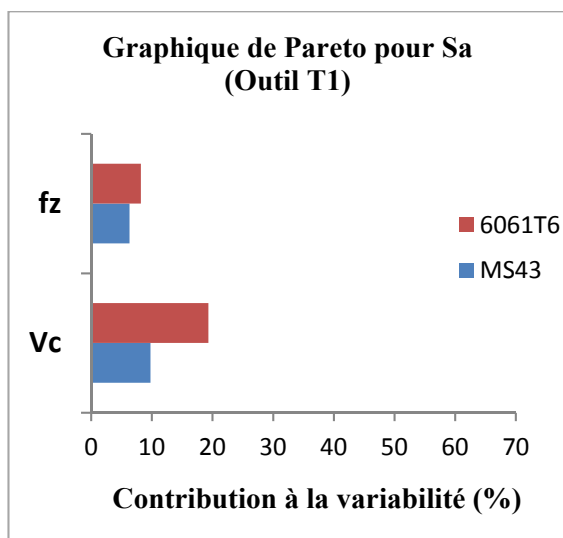


Figure 4-29 : Contribution des paramètres de coupe à la variabilité (Outil T1)

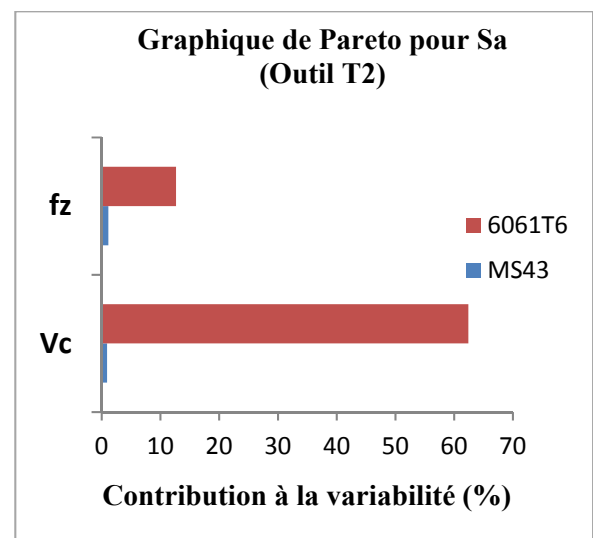


Figure 4-30 : Contribution des paramètres de coupe à la variabilité (Outil T2)

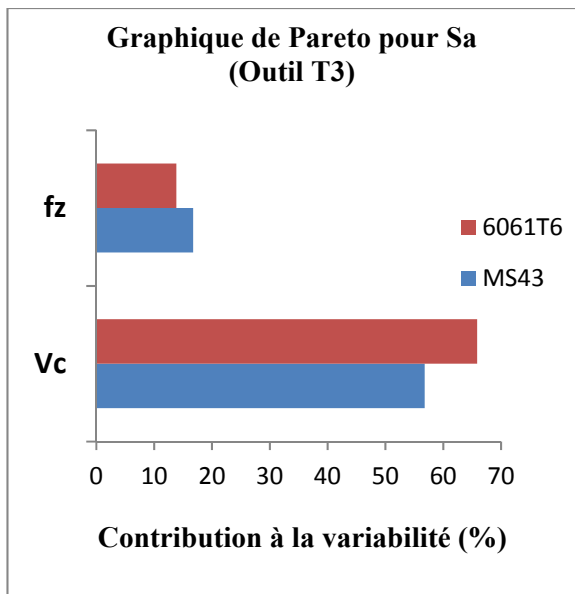


Figure 4-31 : Contribution des paramètres de coupe à la variabilité (Outil T3)

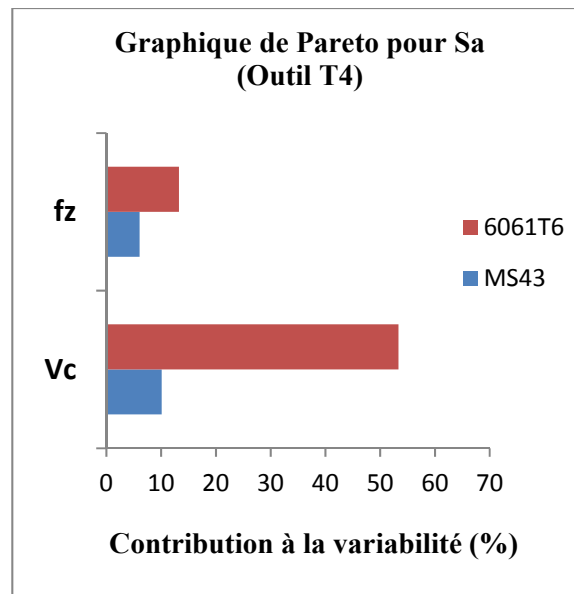


Figure 4-32 : Contribution des paramètres de coupe à la variabilité (Outil T4)

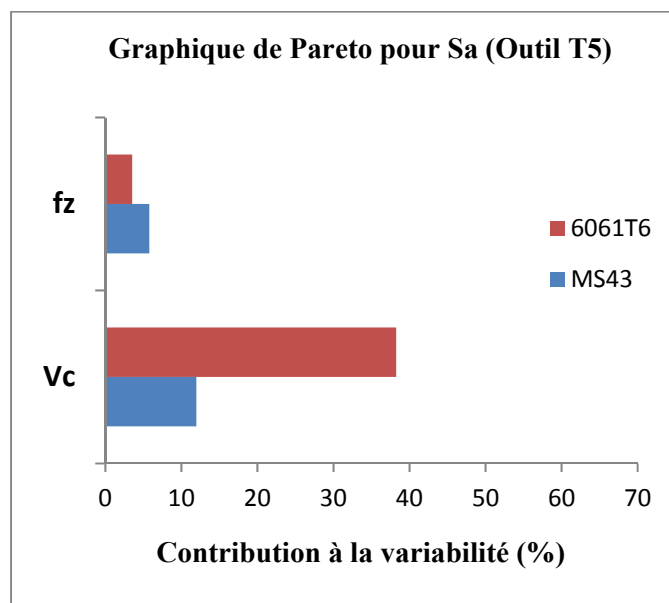


Figure 4-33 : Contribution des paramètres de coupe à la variabilité (Outil T5)

Seuls les paramètres sélectionnés vont être figurés dans le modèle expérimental de prédiction. Nous constatons que pour tous les diamètres ainsi que pour les deux matériaux la contribution de la vitesse de coupe est toujours supérieure à la contribution de la vitesse d'avance. La contribution de la vitesse de coupe pour Al6061-T6 par un taux de variabilité entre 9 et 60 %

pour les diamètres T1, T2, T3, T4, T5 ce qui est un taux satisfaisant expliquant plus de 50 % de variabilité de la rugosité. Pour le MS43 la variation est de 40 % (entre 17 et 57 % comme variation maximale) ce qui approuve que les paramètres de coupes sélectionnés sont plus compatibles selon sa composition chimique, ses propriétés mécaniques et surtout le pourcentage de silicium.

#### 4.4 Optimisation de la rugosité de surface arithmétique surfacique Sa

Une optimisation multi réponses est proposée pour les paramètres d'amplitudes Sa, Sq, Sv, Sz, Ssk, Sku, Sp pour le MS43 et le Al6061-T6, et les paramètres de coupe suivant le plan d'expérience proposé. Suite à la modélisation effectuée, les résultats optimaux qui minimisent la rugosité arithmétique surfacique ainsi que les résultats qui assurent une rugosité désirable de 0,8 micromètre dans le milieu industriel sont présentés en fonction des différents diamètres d'outils dans la figure 4.34. Donc ça nous permet de visualiser la plage des différentes valeurs que peuvent prendre les paramètres décrivant l'état de surface, et ce pour la plage de variation des facteurs.

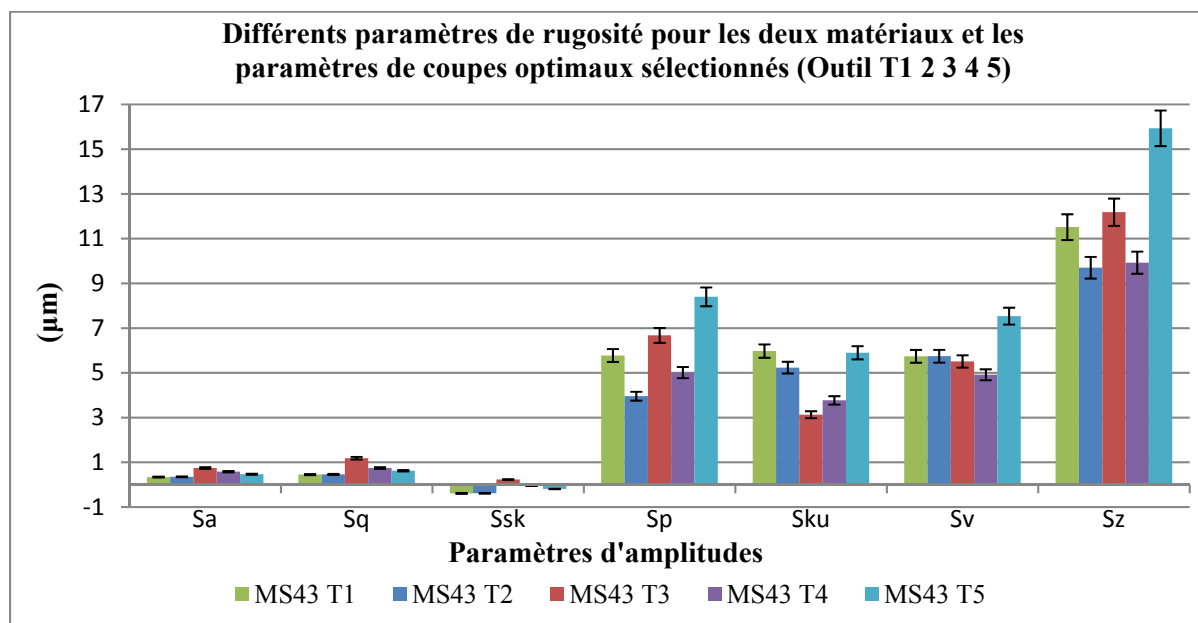


Figure 4-34 : Comportement de paramètres de rugosité avec les différents outils

La figure ci-dessus nous permet d'avoir une idée claire sur les paramètres d'amplitude pour les paramètres de coupes optimaux de chaque outil utilisé pour le matériau MS43, ce qui nous

aide avoir une idée sur les paramètres de coupe ainsi que la rugosité pour des autres outils de coupe, en appliquant une interpolation linéaire de tous ces paramètres.

#### 4.5 L'influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe

Une analyse des forces de coupe appliquée par l'outil sur la pièce, obtenue pendant l'opération de contournage du matériau MS43, a été effectuée en faisant varier les paramètres de coupe. Le signal caractérisant la force de coupe le long de l'axe X de la machine en fonction du temps pendant l'usinage est fourni dans l'annexe 4. Le signal numérique a été divisé en deux parties. La première partie se compose de cinq pics de signaux, représentant la force appliquée par l'outil dans les conditions de coupe suivantes : les avances par dent 0,0254, 0,02413, 0,02286, 0,02159 et 0,02032 mm/dent respectivement et une vitesse de coupe constante de 137,16 mm/min. La deuxième partie (du cinquième pic jusqu'au dixième) représente la même variation de débit, mais avec une vitesse de coupe de 121,92 mm/min. Pour les paramètres de coupe de 137,16 mm/min, 0,0254 et 0,02413 mm/dent, deux pics très élevés ont été observés. Il est à noter qu'à partir du troisième pic, le signal se stabilise. Le même principe a été appliqué pour le Al6061-T6. Les spectres associés à l'effort de coupe selon l'axe X, les deux paramètres vitesse de coupe et avance par dent ont des influences non considérables sur l'amplitude des efforts pour ce matériau. Nous remarquons des amplitudes presque constantes avec toutes les combinaisons des paramètres de coupes. Cette remarque nous permet de conclure que pour le Al6061-T6 et avec cette plage des paramètres de coupes l'outil fonction très loin de la zone de résonance.

Les efforts de coupe analysés présentent deux pics de force, l'un avec une vitesse de coupe 137,16 mm/min et une avance 0,0254 mm/dent, et le second avec 121,92 et 0,02413 mm/dent. La figure 4.35 montre que la force de coupe entre 121,92 et 91,44 mm/min est presque stable. Pour la vitesse de coupe 137,16 mm/min et entre 0,0254 et 0,02286 mm/dent, la force  $F_x$  est élevée, mais avec le reste des vitesses de coupe, elle reste toujours stable. Sa valeur est comprise entre 11 et 17 N avec toutes les vitesses d'avance par dent, comme elle montre la figure 4.36. Les résultats ci-dessous montrent que l'usinabilité de l'alliage MS43 est meilleure avec des vitesses de coupe inférieures ou égales à 137,16 mm/min, et avec des valeurs de débit variables de 0,0254 à 0,02159 mm/dent. Au-dessus de 121,92 mm/min, il est possible d'avoir



des forces de coupe très élevées en particulier avec les débits 0,0254 et 0,02159 mm/dent c'est dû à la dureté du matériau. Dans ces conditions, la rupture de l'outil pourrait se produire.

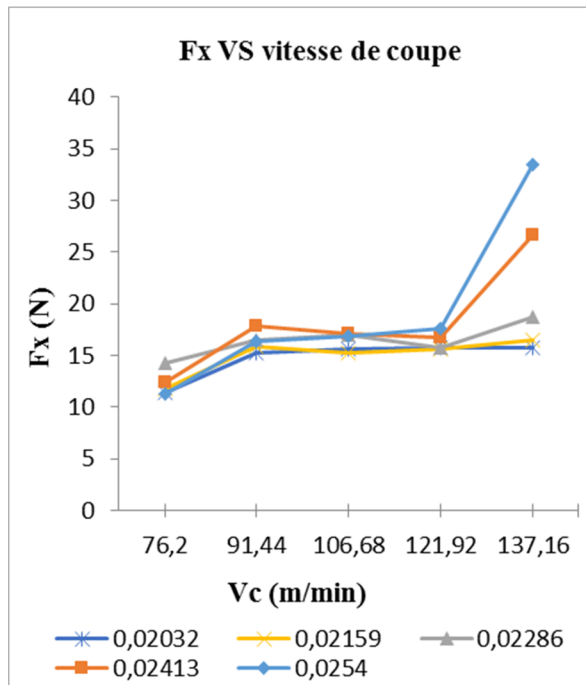


Figure 4-35 : Comportement de l'effort de coupe avec la variation de vitesse de coupe, l'alliage MS43

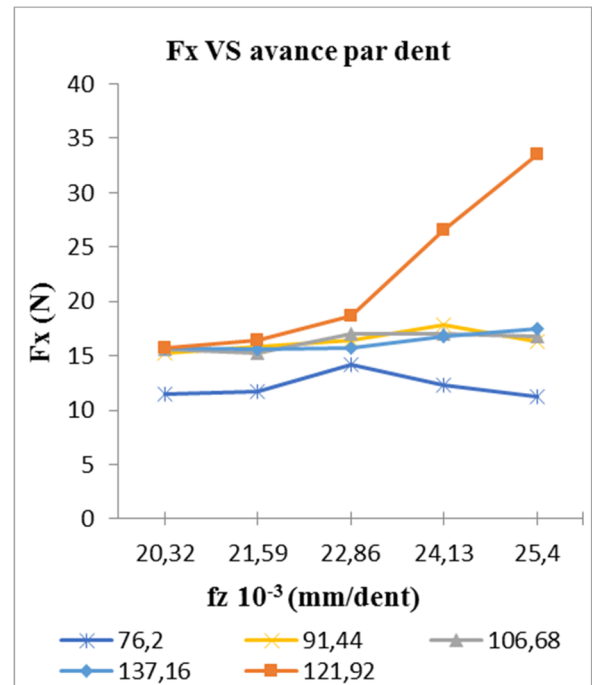


Figure 4-36 : Comportement de l'effort de coupe avec la variation de l'avance par dent, l'alliage MS43

D'ailleurs, les figures suivantes montrent que durant nos essais avec l'alliage Al6061-T6, l'effort de coupe produit est minimum et stable avec tous les paramètres d'usinage. La seule raison pour laquelle n'existe pas une augmentation des efforts de coupes comme pour le MS43, est la dureté de cet alliage, les paramètres qu'on utilise ici sont désignés pour des matériaux durs, rigides et abrasifs, est-ce n'est pas le cas avec l'alliage Al6061-T6. Pendant l'usinage, les particules de silicium qui résistent à la température et rendent l'enlèvement de matière plus difficile n'existent pas dans cet alliage, donc au niveau du point de contact outil matière l'aluminium se fond rapidement ce qui diminue l'effort d'enlèvement de matière.

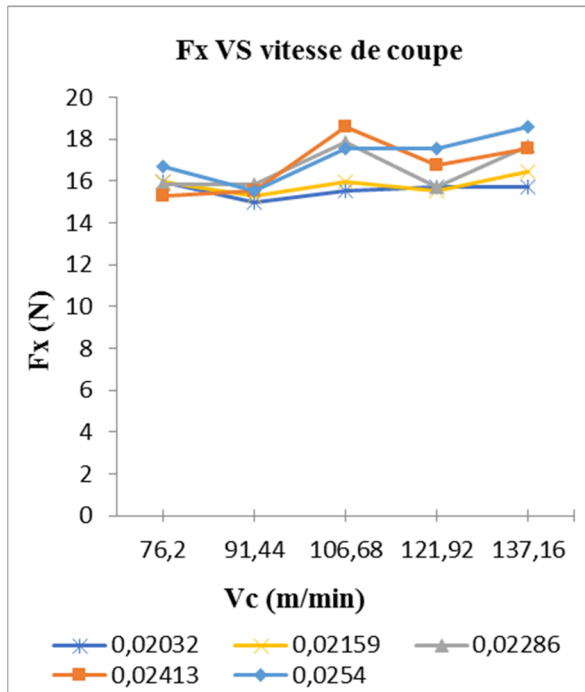


Figure 4-37 : Comportement de l'effort de coupe avec la variation de vitesse de coupe, l'alliage Al6061-T6

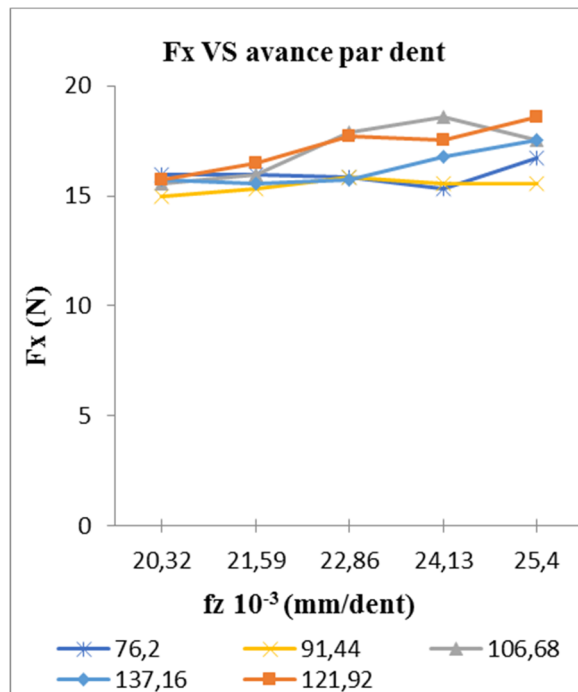


Figure 4-38 : Comportement de l'effort de coupe avec la variation de l'avance par dent, l'alliage Al6061-T6

#### 4.6 L'influence de paramètres de coupe sur la vibration de la pièce

La vibration est également un critère important pour évaluer l'usinabilité de l'alliage étudié. L'analyse du comportement vibratoire de la pièce en fonction des paramètres de coupe permet de confirmer l'effet de la variation de la vitesse de coupe, ainsi que l'avance par dent sur la stabilité d'usinage. Les vibrations de la pièce selon les trois axes ont été mesurées pendant le processus de fraisage. Notre étude se concentre sur  $V_y$ , la vibration dans la direction perpendiculaire à l'axe de l'outil, et dans la même direction que le mouvement de l'outil. Dans l'annexe 4 des spectres montrent l'influence des paramètres de coupe sur la composante de la vibration  $V_y$  pendant le processus de fraisage. Nous remarquons que les signaux de la vibration  $V_y$  sont très similaires aux signaux de force  $F_x$ . Pour les paramètres de coupe de 137,16 mm/min, 0,0254 et 0,02413 mm/dent, nous observons deux pics un peu élevés et à partir du troisième pic, le signal se stabilise.

D'après les spectres des vibrations, nous constatons que le type du matériau a pratiquement un effet énorme, ainsi que les paramètres de coupes, sûr l'amplitude de vibration. Cependant, nous observons que l'amplitude des pics de vibration est presque stable avec tous les paramètres de coupes ce qui est contraire à l'alliage MS43. Par contre, les amplitudes sont plus élevées pour l'alliage MS43 avec un effet direct quasi linéaire et proportionnel à la dureté de ce dernier.

Nous constatons un effet faible de la vitesse de coupe et de l'avance sur la vibration. La variation d'amplitude entre les cinq premiers et deuxièmes pics ne signifie pas une variation remarquable, malgré que pour le reste de signal on remarque une dimension de l'amplitude sous l'effet de la dimension des paramètres de coupes, mais ça reste toujours négligeable. La figure 4.39 montre que la vibration atteint le point le plus haut lorsque l'usinage est à 137,16 mm/min et 0,0254 mm/dent. Ensuite, le deuxième point de vibration le plus élevé est enregistré à 137,16 mm/min et 0,02413 mm/dent. Le fait que la vitesse de coupe diminue à 121,92 mm/min, la vibration diminue également, et par conséquent l'usinabilité du matériau s'améliore.

L'analyse montre clairement que la vibration s'est stabilisée entre 0,15  $\mu\text{m}$  et 0,36  $\mu\text{m}$  de vibration pour une valeur de vitesse de coupe inférieure ou égale à 121,92 mm/min et pour des vitesses d'avance de 0,0254 à 0,02032 mm/dent. D'autre part, la figure 4.40 montre qu'il est possible d'usiner avec 137,16 mm/min, mais avec une valeur maximale d'avance de 0,02286 mm/dent.

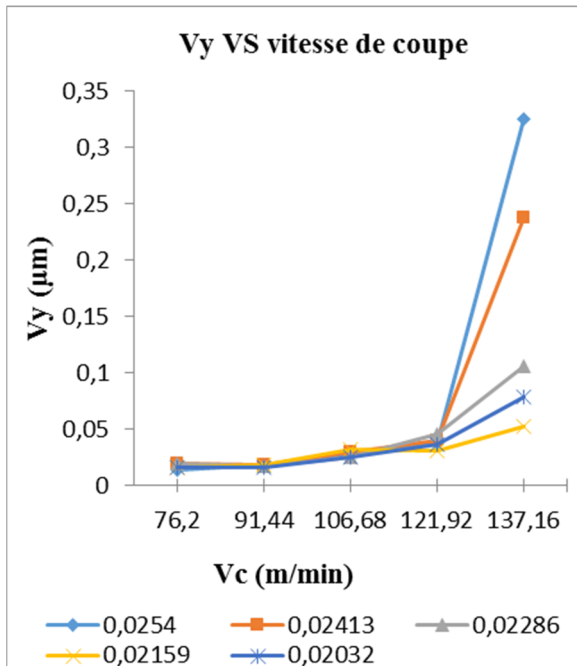


Figure 4-39 : Comportement de la vibration en fonction de la variation de vitesse de coupe, l'alliage MS43

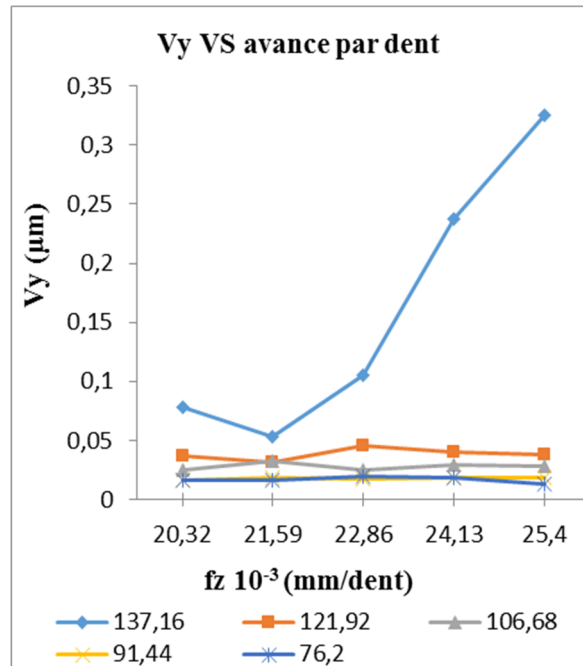


Figure 4-40 : Comportement de la vibration en fonction de la variation de l'avance par dent, l'alliage MS43

Pour l'alliage Al6061-T6, les courbes de vibration en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance sont illustrées dans les figures suivantes. D'abord la valeur d'amplitude maximale de vibration atteinte est 0,05 µm par contre pour l'alliage MS43 la valeur maximale enregistrer est de l'ordre de 0,34 µm. La seule raison pour laquelle nous observons une diminution des efforts de coupes par rapport à l'alliage MS43 est la différence au niveau de la dureté. L'analyse montre qu'il y a une augmentation de vibration avec les vitesses de coupe 121,92 mm/min et 137,16 mm/min, mais ça reste toujours négligeable et n'a pas un effet majeur sur l'état de surface.

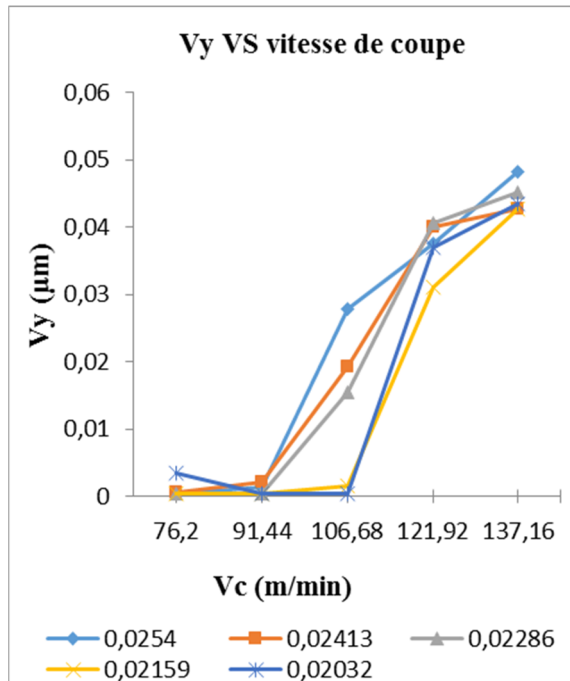


Figure 4-41 : Comportement de la vibration en fonction de la variation de vitesse de coupe, l'alliage Al6061-T6

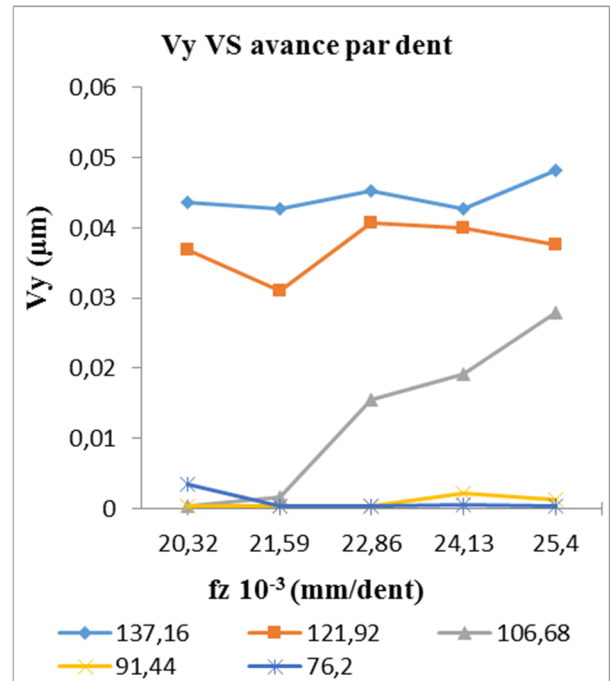


Figure 4-42 : Comportement de la vibration en fonction de la variation de l'avance par dent, l'alliage Al6061-T6

#### 4.7 Effets de l'usinage sur la microstructure

Dans un premier temps, nous allons étudier les effets principaux des facteurs, à savoir le matériau, le rayon du bec de l'outil, la vitesse de coupe et l'avance par dent sur la microstructure.

Les échantillons utilisés pour l'analyse de la rugosité sont utilisés pour donner un aperçu sur les variations au niveau de la microstructure, l'effet des opérations d'usinage, les efforts de coupe sur la surface et les défauts engendrés par les différents facteurs de notre plan d'expérience. L'analyse concerne les échantillons pour les paramètres de coupe optimaux enregistrés dans cette étude.

Le tableau ci-dessous représente les microstructures et le profil de rugosité avec différents outils de coupe et les paramètres optimaux.

Tableau 4-4 : Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T1

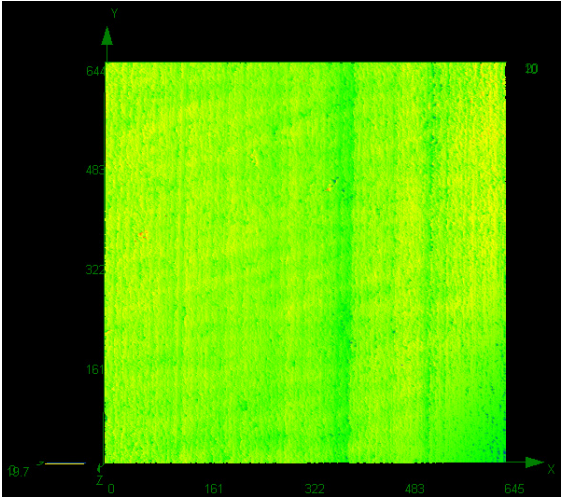
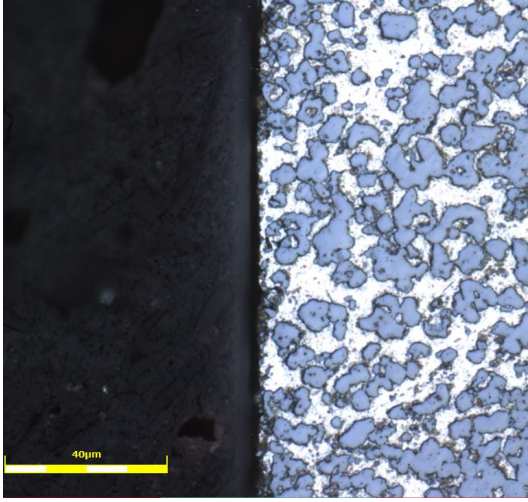
Diamètre Outils T1	Vc (m/min)	Fz (mm/dent)	Rugosité Sa ( $\mu\text{m}$ )
1,194	45,72	0,0124	0,341
			
Cartographie de surface		Microstructure	

Tableau 4-5 : Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T2

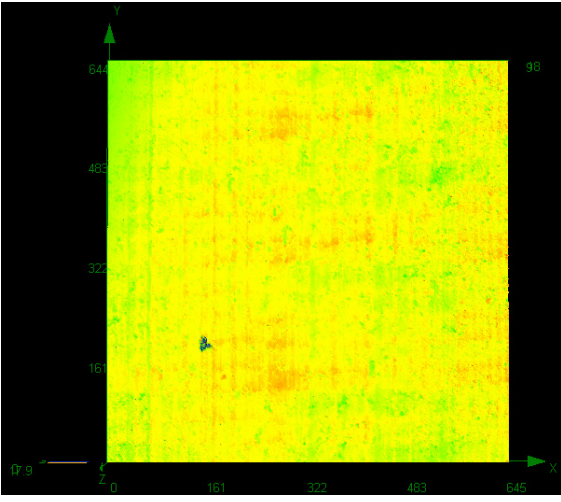
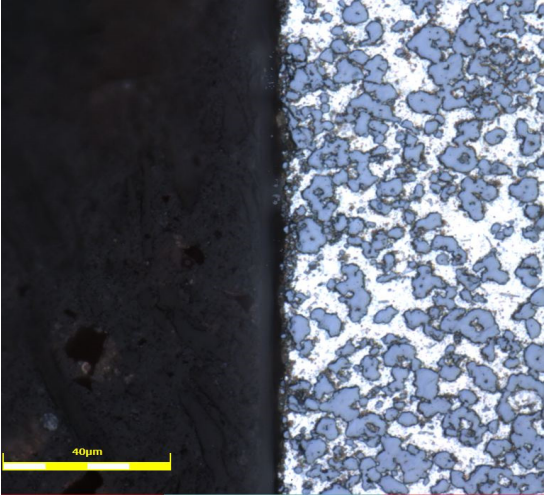
Diamètre Outils T2	Vc (m/min)	Fz (mm/dent)	Rugosité Sa ( $\mu\text{m}$ )
2,286	137,16	0,0178	0,350
			
Cartographie de surface		Microstructure	

Tableau 4-6 : Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T3



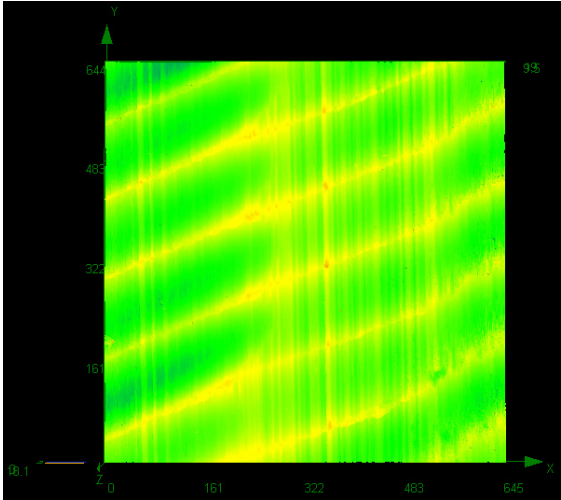
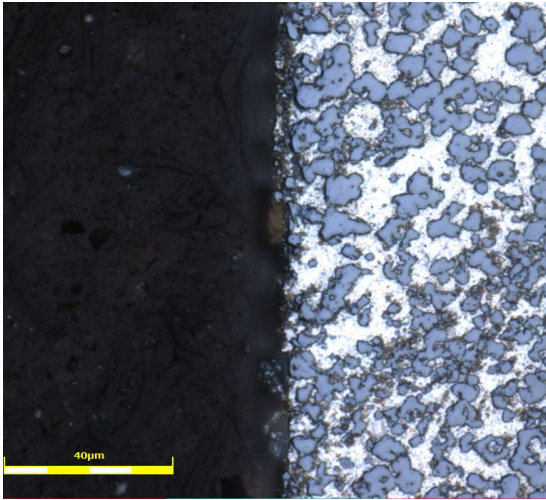
Diamètre Outils T3	Vc (m/min)	Fz (mm/dent)	Rugosité Sa ( $\mu\text{m}$ )
3,175	76,2	0,0241	0,743
			
Cartographie de surface		Microstructure	

Tableau 4-7 : Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T4

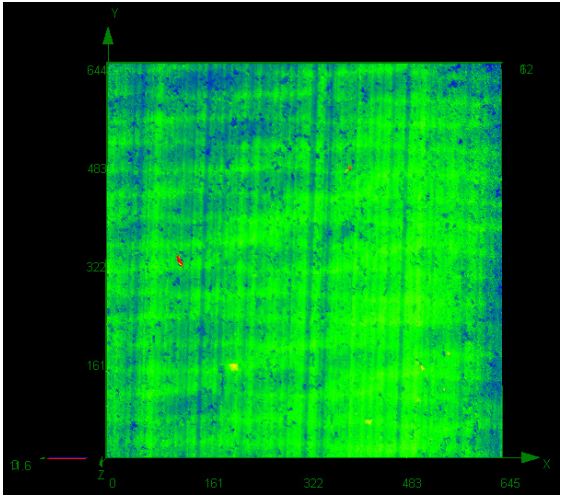
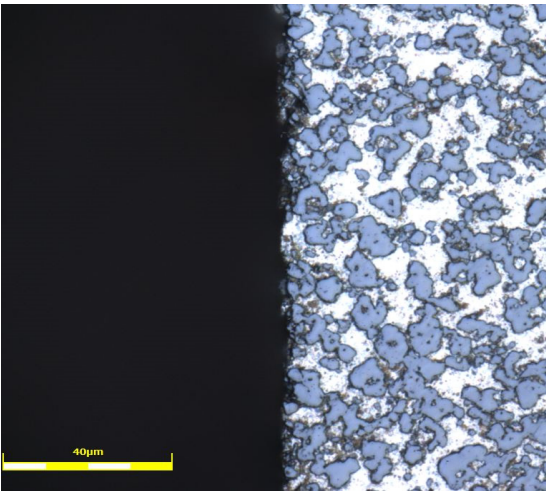
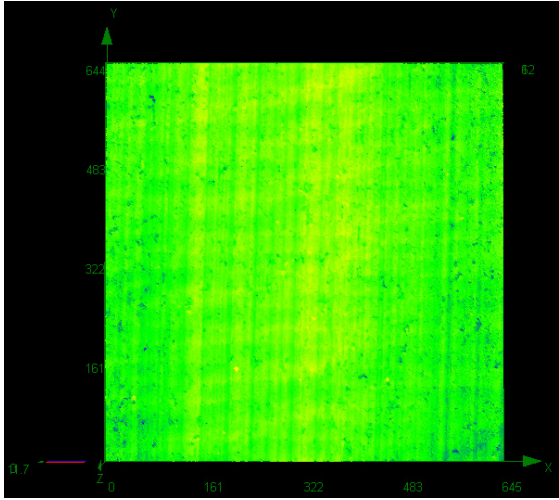
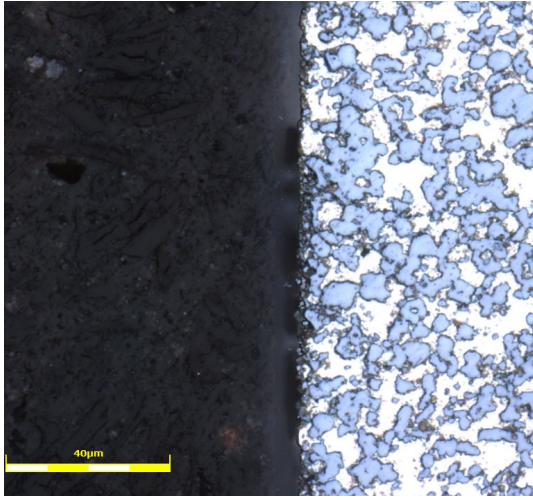
Diamètre Outils T4	Vc (m/min)	Fz (mm/dent)	Rugosité Sa ( $\mu\text{m}$ )
4,750	76,2	0,0368	0,581
			
Cartographie de surface		Microstructure	

Tableau 4-8 : Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T5

Diamètre Outils T5	Vc (m/min)	Fz (mm/dent)	Rugosité Sa ( $\mu\text{m}$ )
6,350	76,2	0,0495	0,463
			
Cartographie de surface		Microstructure	

C'est un alliage aluminium silicium. Il présente un composite avec 53 % de silicium avec un mélange de grains équiaxes ou sphérique, donc dans ce cas on ne peut pas séparer la direction longitudinale de celle transversale à partir d'une analyse de la microstructure.

La présence de cette géométrie de grains est le résultat d'un traitement thermique de recristallisation rapide. Deux types de défauts seront pris en compte : les délaminations (des fissures entre les grains de silicium et la matrice d'aluminium), ainsi que les irrégularités ou bien les arrachements des grains de silicium de la matière de la pièce. Après avoir appliqué les essais d'usinage avec différent outil et paramètres de coupe nous avons effectué des observations sur la microstructure pour déterminer l'effet de ces paramètres sur la surface de contact outil matière.

Dans tous les cas, le fini de surface usiné ne présente aucune irrégularité ou défaut. Les photos de la microstructure étaient prises selon l'axe de l'outil ce qui nous permet d'avoir une idée sur la propagation des défauts ou des modifications microstructurales sur quelques millièmes de millimètre en profondeur à partir de la face de coupe. Mais c'est fortement probable que



sous l'effet de la composition de cet alliage et ces caractéristiques mécaniques ainsi que les paramètres de coupe sélectionnés nous permettent d'avoir des échantillons sans des défauts au niveau de la microstructure.

#### 4.8 Interpolation et courbes de prédiction des paramètres de coupe

Le tableau 4.9 suivant résume les paramètres de coupe optimaux qui sont valides pour les paramètres représentés dans le plan d'expérience. De plus, et en se basant sur ces données, des courbes qui vont être générées, pour une recommandation des valeurs des paramètres de coupe en fonction de l'état de surface escompté.

Tableau 4-9 : Paramètres de coupe recommandés deux matériaux et différents diamètres

Outils	Paramètres	Pour une rugosité maximale inférieure à 0,8		Rugosité minimale enregistrée	
		MS43	Al6061-T6	MS43	Al6061-T6
T1	Vc (m/min)	60,96	60,96	45,72	45,72
	Fz (mm/dent)	0,0124	0,0178	0,0152	0,0124
	Sa (µm)	0,629 ± 0.1	0,521 ± 0.05	0,341 ± 0.1	0,235 ± 0.05
T2	Vc (m/min)	137,16	121,92	137,16	137,16
	Fz (mm/dent)	0,0178	0,0178	0,0165	0,0188
	Sa (µm)	0,439 ± 0.06	0,591 ± 0.05	0,350 ± 0.06	0,471 ± 0.05
T3	Vc (m/min)	76,2	91,44	76,2	91,44
	Fz (mm/dent)	0,0241	0,0203	0,0228	0,0228
	Sa (µm)	0,791 ± 0.13	0,744 ± 0.07	0,743 ± 0.13	0,607 ± 0.07
T4	Vc (m/min)	76,2	137,16	76,2	91,44
	Fz (mm/dent)	0,0368	0,033	0,0356	0,0343
	Sa (µm)	0,756 ± 0.11	0,806 ± 0.08	0,581 ± 0.11	0,453 ± 0.1
T5	Vc (m/min)	106,68	137,16	76,2	106,68
	Fz (mm/dent)	0,0495	0,0495	0,0483	0,047
	Sa (µm)	0,497 ± 0.06	0,347 ± 0.05	0,463 ± 0.06	0,68 ± 0.05

Le modèle expérimental de prédiction des paramètres de rugosité auquel cette étude a abouti suite à une étude statistique est présenté dans les figures suivant. Ce modèle nous permet de déterminer la rugosité surfacique arithmétique  $S_a$ , pour des différents diamètres d'outil et avec une recommandation des paramètres de coupe. Et pour le reste des paramètres de rugosité  $S_q$ ,  $S_v$ ,  $S_c$ ,  $S_{sm}$  et  $S_k$  sont inscrits dans l'annexe. Les figures suivantes permettent alors de visualiser

la variation de l'état de surface en fonction des variations du diamètre d'outil, de la vitesse de coupe et de l'avance par dent.

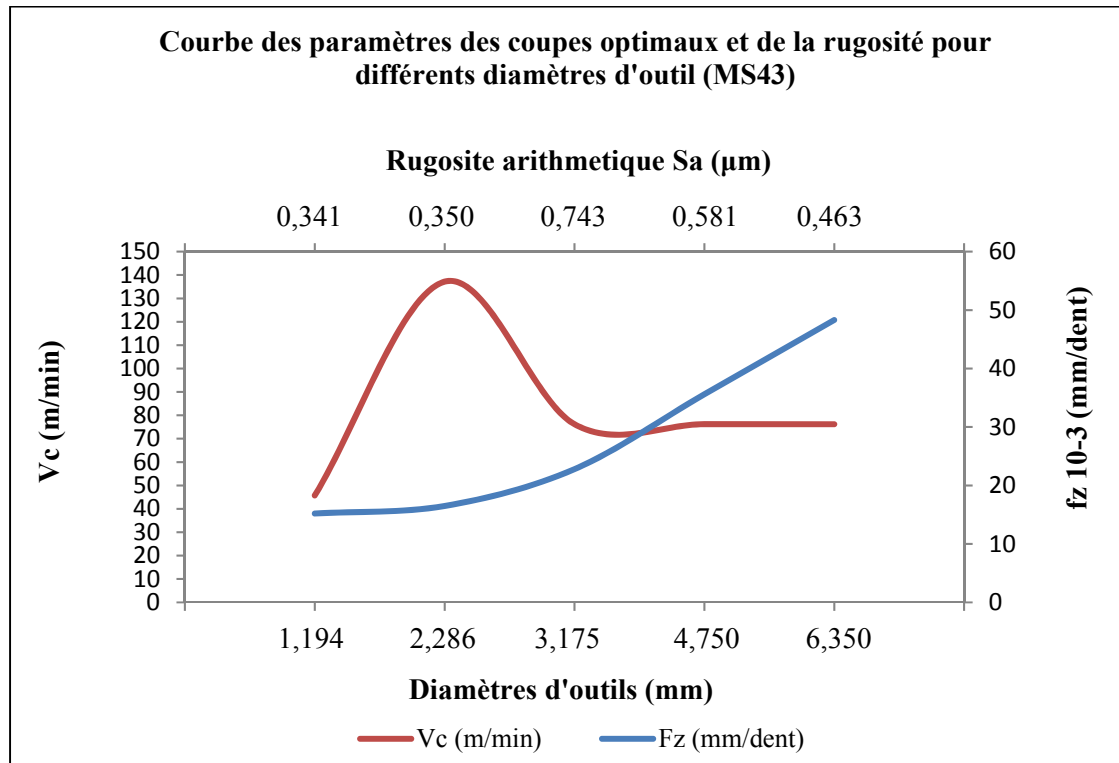


Figure 4-43 : Variation de la rugosité en fonction des paramètres de coupe et les diamètres d'outils (MS43)

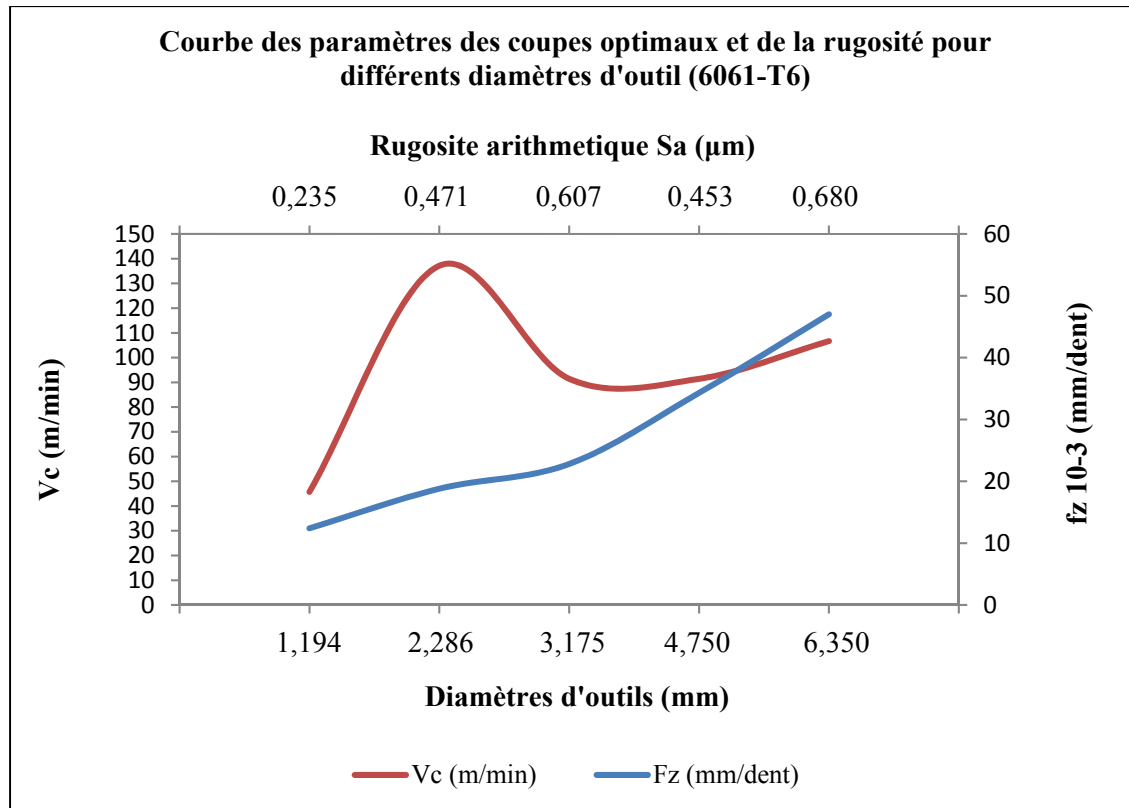


Figure 4-44 : Variation de la rugosité en fonction des paramètres de coupe et les diamètres d'outils (Al6061-T6)

Le modèle expérimental de prédiction proposé est valide pour un rayon du bec de l'outil 0,381 mm, un diamètre d'outil entre 1,194 et 6,350 mm et une profondeur de passe définie par le fournisseur (1/10 du diamètre d'outil), qui reste toujours flexibles si nous cherchons à améliorer encore la rugosité de surface, en gardant les paramètres de coupe qui sont optimaux. De plus, et en se basant sur les courbes proposées ci-dessus, une courbe pour le matériau MS43 et 22 diamètres d'outil est générée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4-10 : Tableau des paramètres de coupes recommandées pour le matériau MS43

Diamètre d'outil (pouce)	Vitesse de coupe (m/min)	Avance par dent (mm/dent)	Sa prédite (micromètre)
0,047	46	0,01240	0,341
0,050	52	0,01278	0,342
0,055	63	0,01340	0,343
0,060	73	0,01403	0,345
0,062	78	0,01428	0,346
0,065	84	0,01466	0,347
0,070	95	0,01529	0,348
0,075	105	0,01592	0,350
0,078	112	0,01629	0,351
0,080	116	0,01654	0,351
0,085	127	0,01717	0,353
0,090	137	0,01780	0,354
0,093	132	0,01834	0,388
0,095	128	0,01870	0,410
0,100	120	0,01960	0,465
0,109	104	0,02122	0,565
0,118	88	0,02284	0,665
0,125	76	0,02410	0,743
0,140	76	0,02717	0,704
0,156	76	0,03045	0,662
0,187	76	0,03680	0,581
0,250	76	0,04950	0,463

Cette courbe permet de visualiser la plage des différentes valeurs que peuvent prendre les paramètres sélectionnés décrivant l'état de surface, et ce pour la plage de variation des diamètres.

Dans la suite de cette étude, les graphiques détaillés les résultats de l'analyse statistique seront présentés dans les annexes de ce mémoire. Seule l'analyse des résultats principaux est présentée dans ce chapitre avec les modèles de prédiction proposés.

La même démarche d'analyse a été suivie pour l'analyse du comportement des paramètres de rugosité, afin d'aboutir à des modèles de prédiction logiques. Les facteurs les plus influents ont été décelés. De plus, les résultats de l'étude statistique de ces paramètres ont été classés dans les annexes de ce mémoire, pour éviter tout encombrement vu la multitude des résultats dérivants de la même démarche. Le but étant l'analyse du comportement des paramètres de rugosité en fonction des paramètres d'usinage, suite à une analyse de la variance, les graphiques Pareto ont mis en évidence la contribution de chaque facteur sur chaque réponse. Les facteurs définis par littérature pour modéliser le comportement des réponses sont la vitesse de coupe et l'avance par dent, qui sont les facteurs les plus significatifs ayant un poids remarquable dans les modèles de prédictions, suite à leurs contributions directes et leurs interactions.

Afin de s'assurer de la validité de nos résultats pour chacun des paramètres de coupe étudiée, une analyse des efforts de coupe a été faite, ainsi d'avoir une idée sur les efforts de coupe pour différent diamètre d'outil.

#### **4.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, une étude des effets des conditions de coupe sur les paramètres de rugosité de surface a été faite. Il a été conclu que la rugosité de surface augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance et la vitesse de coupe qui sont les paramètres les plus significatifs sur la rugosité. Même interprétation avec l'alliage Al6061-T6. De plus, une différence a été observée au niveau de l'influence de ces deux paramètres, un effet plus faible sur l'état de surface a été enregistré avec la variation de l'avance par dent. Dans la plage de variation des paramètres de coupe dans cette étude, l'alliage MS43 se comporte mieux et le fini de surface est plus amélioré que l'Al6061-T6 et même comportement avec différents outils de coupes.

Suite à une analyse de la vibration et une analyse des effets directs et leurs interactions avec les paramètres de coupe, on a constaté que la vitesse de coupe influe considérablement la vibration et que cette influence suit la variation de fini de surface, c'est-à-dire, l'augmentation de la vitesse de coupe provoque la vibration de l'outil et donc une diminution de la qualité de surface, par contre on a remarqué que cette variation n'a pas d'effet sur la microstructure. Donc

l'analyse de vibration montre que la vitesse de coupe se distinguait de l'avance par dent qui présente une faible contribution sur l'amplitude des pics de vibration. La tendance des vibrations a été expliquée par l'existence de deux phénomènes thermiques et mécaniques dans la zone de coupe ainsi que les caractéristiques du matériau.

Concernant les efforts de coupe, nous avons vu qu'ils dépendent énormément de la vitesse de coupe ainsi que de l'avance. Malgré que les efforts de coupe sont plus au moins pareils entre l'alliage MS43 et Al6061-T6, on a remarqué que la vibration est plus importante avec le MS43 que l'alliage Al6061-T6. On a remarqué aussi selon la tendance de la courbe de la rugosité en fonction de la variation des paramètres de coupe que tous les outils de coupe sont stables avec l'alliage MS43, ce qui n'est pas toujours vrai pour l'alliage 6061T6.

Après avoir déterminé pour chaque type de données les paramètres optimaux, l'objectif a été de trouver un compromis entre toutes ces valeurs afin d'optimiser la valeur de la rugosité, tout en limitant les défauts sur la microstructure et en maximisant le débit d'enlèvement de matière. Pour cela, les valeurs optimales enregistrées sont étudiées et l'on privilégie pour générer un modèle expérimental qui recommande des paramètres de coupes optimaux pour différent outil avec une prévision de la valeur de rugosité arithmétique surfacique. Dans le chapitre qui suit, des essais de validations et une analyse, des défauts seront présentés.

## **CHAPITRE 5**

### **VALIDATION DE RÉSULTATS**

#### **5.1 Introduction**

La validation des résultats repose sur des essais de validations afin d'aboutir à la prédiction escomptée et adéquate. Il faut tout d'abord vérifier la linéarité du modèle qui est l'hypothèse principale pour un modèle de régression. Il faut aussi s'assurer du fait que la variance des erreurs est constante quel que soit l'observation et que les erreurs sont indépendantes. Ces erreurs sont estimées par les résidus  $e_i$  (différence entre les valeurs observées et les valeurs prévues). Une analyse graphique des résidus en fonction des valeurs estimées et en fonction des données relatives aux variables explicatives nous a permis de vérifier ces hypothèses et, par la suite, de valider le modèle expérimental. En bref, si nous voulons vérifier la validation des valeurs prédites, il faut vérifier la linéarité du modèle, le fait que la variance des erreurs est constante quelle que soit l'observation.

#### **5.2 Les essais de validation**

Une optimisation est proposée pour la rugosité surfacique arithmétique de surface  $S_a$  et pour les paramètres de coupe (vitesse de coupe et avance par dent) dans cette étude.

Pour valider l'exactitude des valeurs des paramètres de prédiction de la rugosité comme ceux des paramètres de coupe, des essais supplémentaires ont été effectués chez notre partenaire Nétur. Ces derniers sont réalisés sur la machine-outil à commande numérique et les conditions de coupe utilisées sont illustrées dans le tableau 5.1.

Tableau 5-1 : Paramètres de coupe utilisés pour les essais de validation

	<b>Outils</b>	<b>T1 (27262-C4)</b>	<b>T2 (27278-C4)</b>	<b>T3 (27299-C4)</b>
<b>Propriétés géométriques</b>	Diamètre de coupe (mm)	1,57	1,98	2,54
	Rayon de bec (mm)	0,254	0,254	0,254
	Longueur de coupe (mm)	4,724	5,943	7,62
	Nombre de dents	4	4	4
<b>Paramètres de coupes prédites</b>	Vitesse de coupe (m/min)	77,62	111,64	119,74
	Avance par dent (mm/dent)	0,0142	0,0162	0,0196
<b>Paramètres de coupe du fournisseur</b>	Profondeur de passe radiale (mm)	0,203	0,203	0,127
	Profondeur de passe axiale (mm)	4,673	5,892	7,569

### 5.2.1 Résultats est analyse de la rugosité

Les paramètres de rugosité des essais appliquée sur l'alliage MS43 avec les trois outils de différents diamètres sont mesurés par le microscope « OLYMPUS OLS4100, LEXT », les résultats sont comparés aux valeurs prédites par les modèles de prédiction.



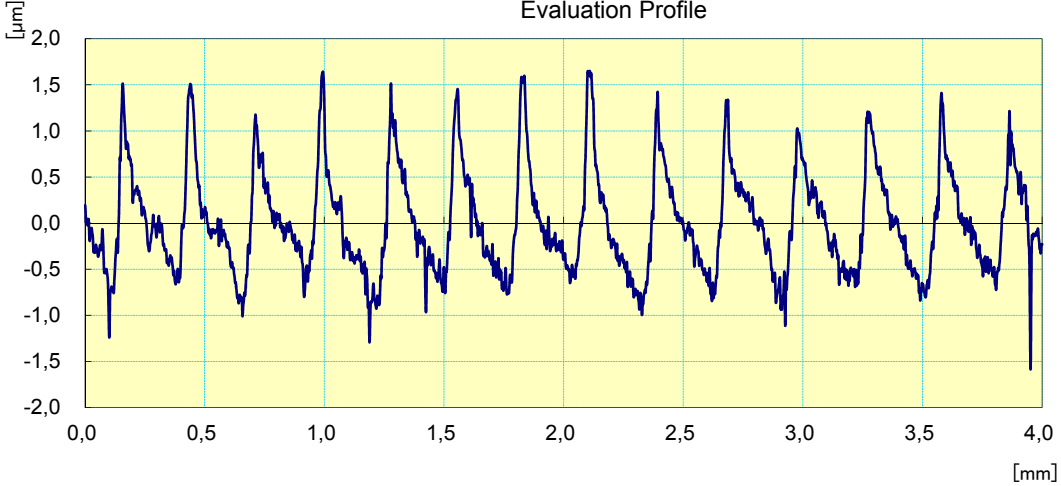
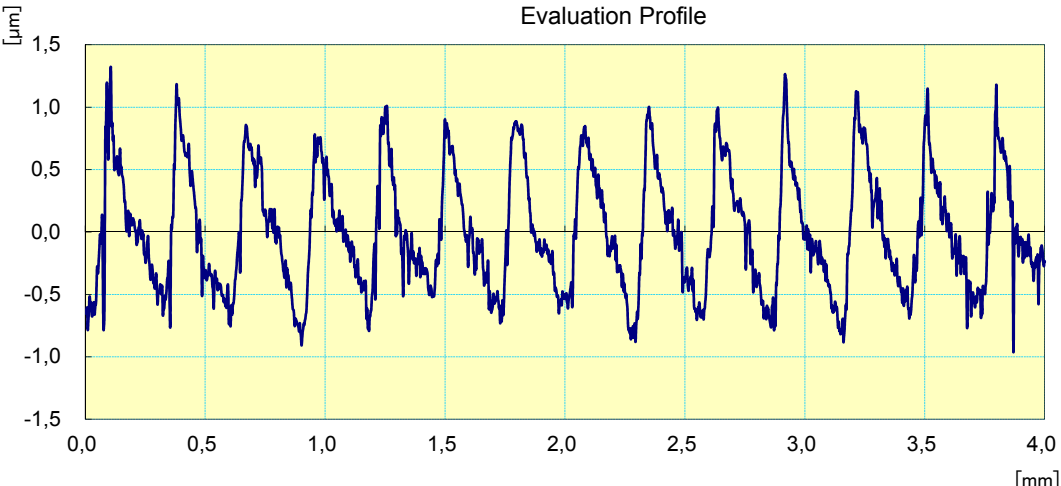
Tableau 5-2 : Résultats des essais de validation

Paramètres de rugosités	T1 (27262-C4)			T2 (27278-C4)			T3 (27299-C4)		
	Valeur prédite	Valeur mesurée	Erreur %	Valeur prédite	Valeur mesurée	Erreur %	Valeur prédite	Valeur mesurée	Erreur %
<b>Rugosité moyenne surfacique arithmétique Sa</b>	0,346	0,373	0,07	0,351	0,353	0,01	0,465	0,407	-0,14
<b>Rugosité moyenne quadratique de la surface Sq</b>	0,45	0,51	0,12	0,475	0,472	-0,01	0,631	0,55	-0,15
<b>Profondeur maximale des vallées Sv</b>	5,73	3,21	-0,79	4,65	4,63	0,00	11,25	4,85	-1,32
<b>Hauteur maximale du profil Sz</b>	11,51	8,79	-0,31	12,28	9,88	-0,24	19,23	12,59	-0,53
<b>Hauteur maximale des pics Sp</b>	5,77	5,58	-0,03	7,63	5,24	-0,46	7,97	7,73	-0,03
<b>Asymétrie du profil Ssk</b>	-0,39	0,51	1,76	0,41	-0,36	2,14	-1,56	0,05	32,20
<b>Aplatissement du profil Sku</b>	5,97	9,21	0,35	14,90	6,45	-1,31	2,11	5,74	0,63

D'après le tableau 5.2 qui résume la précision des résultats concernant les paramètres de rugosité surfacique, nous remarquons bien qu'avec notre modèle linéaire de prédiction nous obtenons de bons résultats. Les erreurs maximales au niveau des résultats concernant presque toutes les valeurs ne dépassent pas 14.25 %.

### 5.2.2 Exemples de profils de rugosité de surface

La figure 5.1 présente quelques exemples de profils de rugosité de surface des échantillons usinés pour la validation des résultats avec différents outils sous différentes conditions de coupe pour le matériau MS-43 et ce, parallèlement à la vitesse d'avance.

	Rugosité Sa ( $\mu\text{m}$ )	Vc (m/min)	Fz (mm/dent)
T1	0,373	77,62	0,0142
	<p>Evaluation Profile</p> 		
T2	0,353	111,64	0,0142
	<p>Evaluation Profile</p> 		
T3	0,407	111,64	0,0196

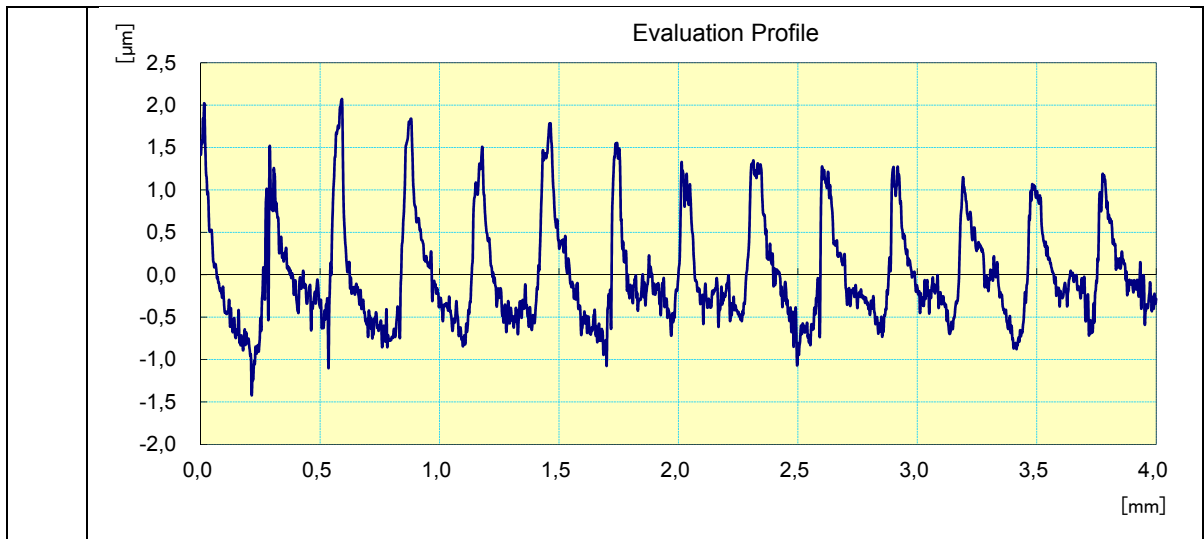


Figure 5-1 : Exemples de profils de rugosité de surface pour le MS-43 pour les paramètres de coupe indiqués

Les erreurs maximales concernant la prédiction des rugosités par un modèle linéaire ne dépassent pas 14.25 %, ce qui confirme que les paramètres de coupe générés par le modèle sont aussi optimaux étant donné l'efficacité et la précision offerte.

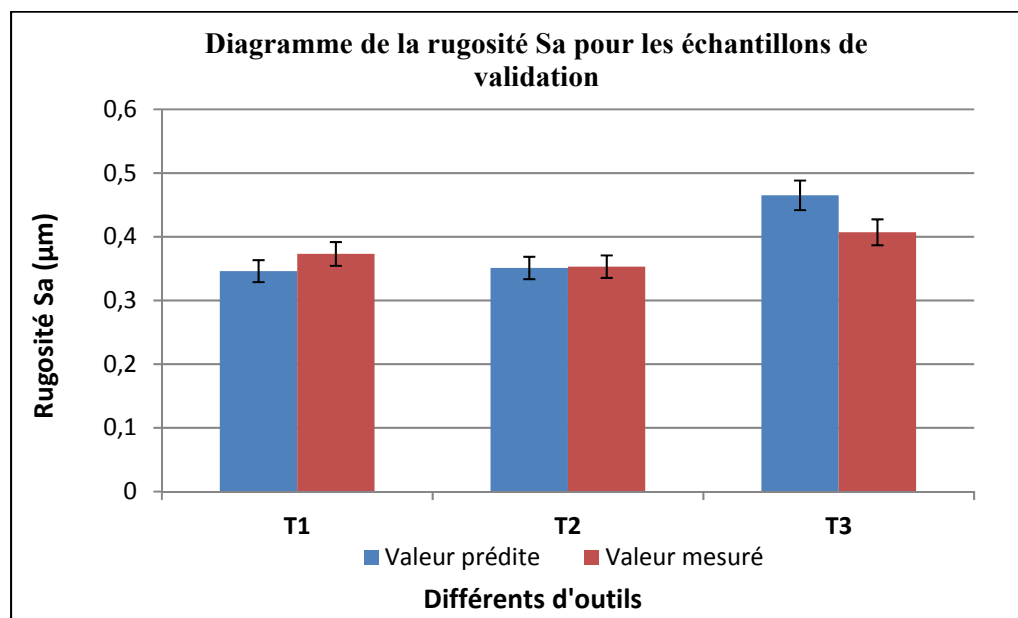


Figure 5-2 : Diagramme de la rugosité Sa pour les échantillons de validation

### 5.2.3 Résultat et analyse de la microstructure

Les échantillons usinés par les paramètres de coupe prédite ont été le sujet d'une analyse de la microstructure. L'objectif est en premier temps, d'étudier les effets principaux des facteurs, à savoir la vitesse de coupe et l'avance par dent prédite à partir du modèle expérimental pour trois différents outils, sur la microstructure. La mesure de ces deux types de défauts passe par un microscope optique grâce auquel des photos seront prises.

Tableau 5-3 : Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T1

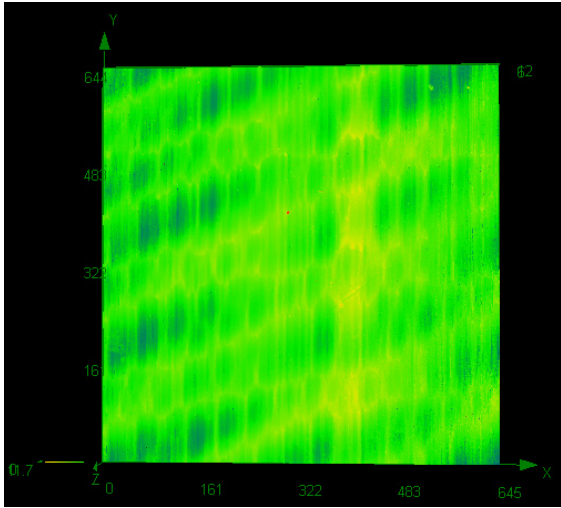
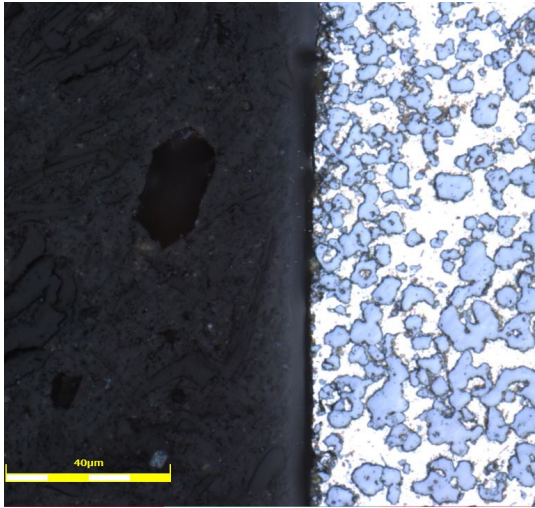
Diamètre Outils T1	Vc (m/min)	Fz (mm/dent)	Rugosité Sa ( $\mu\text{m}$ )
1,57	77,62	0,0142	0,373
			
Cartographie de surface		Microstructure	

Tableau 5-4 : Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T2

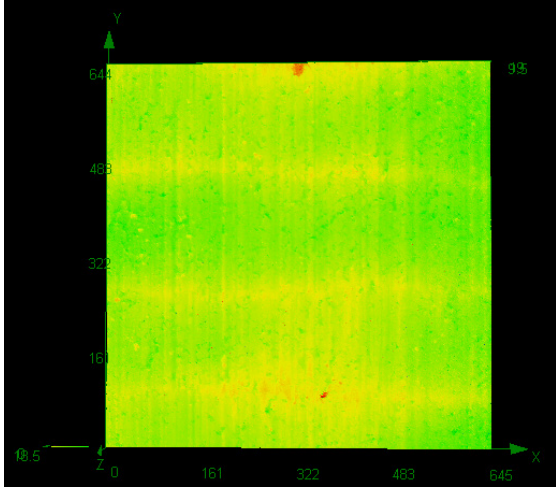
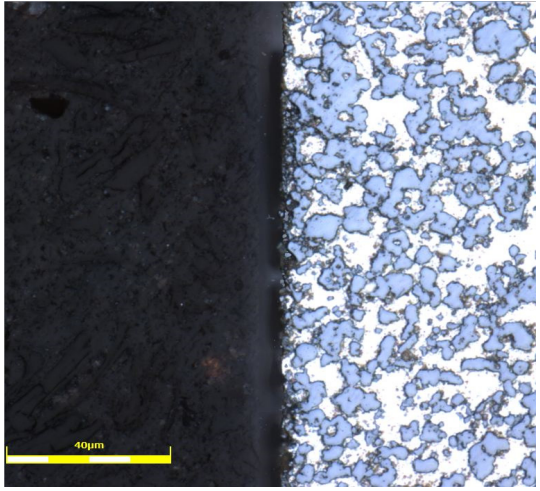
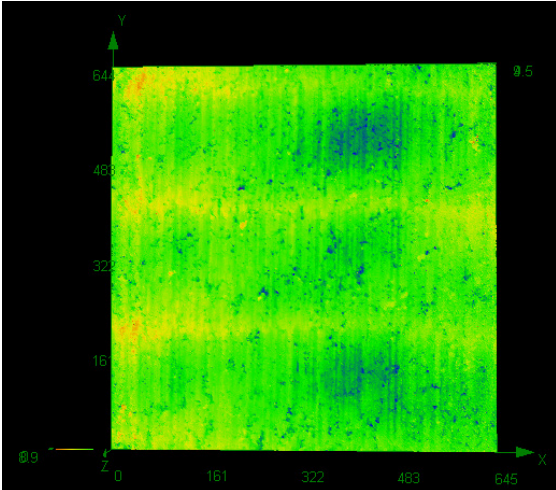
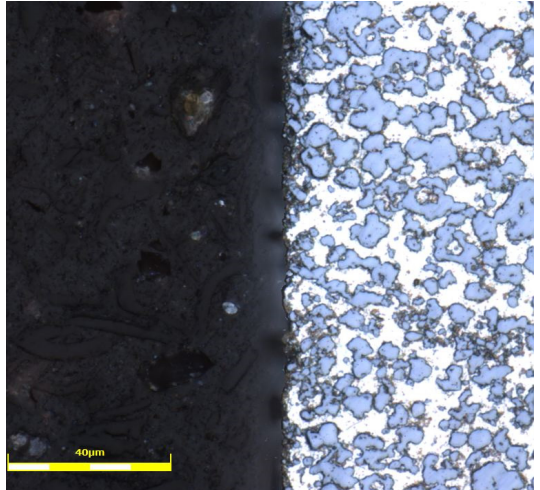
Diamètre Outils T2	Vc (m/min)	Fz (mm/dent)	Rugosité Sa ( $\mu\text{m}$ )
1,98	111,64	0,0162	0,353
			
Cartographie de surface		Microstructure	

Tableau 5-5 : Cartographie de surface et la microstructure pour l'outil de validation T3

Diamètre Outils T3	Vc (m/min)	Fz (mm/dent)	Rugosité Sa ( $\mu\text{m}$ )
2,54	119,74	0,0196	0,407
			
Cartographie de surface		Microstructure	

Deux types de défauts seront pris en compte : les délaminations (des fissures entre les grains de silicium et la matrice d'aluminium), ainsi que les irrégularités ou bien les arrachements des grains de silicium de la matière de la pièce. L'élimination de ces deux types de défauts nous permet d'éviter des problèmes de fatigue, d'amortissement, de durée de vie, d'assemblage, de traitement thermique, de qualité et de fonctionnalité.

Effectivement les analyses viennent pour valider les résultats trouver dans le chapitre analyse et discussion. Tout cela provient de la propriété du matériau, des conditions de coupe sélectionnées et des outils de coupe utilisés ainsi que de leurs géométries.

### **5.3 Usure et dommage de l'outil**

La durée de vie de l'outil est un temps déterminé par la limite de l'usure sur la face de dépouille de l'outil. Elle est une variable très importante parce qu'un temps d'utilisation de l'outil supérieur à la durée de vie de l'outil produit une usure très élevée sur une ou plusieurs faces de l'outil. Cela peut affecter fortement les autres variables de l'usinage. Dans notre cas, nous essayons d'usiner un alliage fortement allié par le silicium, cet alliage donne des caractéristiques très sévères qui affectent énormément l'usinabilité donc la durée de vie de l'outil. Dans le cas d'une rugosité ou d'une erreur dimensionnelle plus élevée que la valeur prescrite, il faut jeter la pièce ou refaire le travail qui n'a pas été bien réalisé. Ceci augmente le temps et le coût de production.

Dans le cadre de notre étude, nous n'appliquons pas une étude approfondie des paramètres et de loi d'usure d'outil sous l'effet de nombre d'outil et d'échantillons utilisé. Nous comparons alors l'effet des paramètres de coupes sur l'usure en dépouille et l'état de surface des différentes surfaces fonctionnelles et l'arrête de coupe pour chaque outil utilisé. Tous les outils ont subi aux mêmes conditions d'usinage, lubrifiant et mode de lubrification, matériau, durée de fonctionnement et paramètres de coupes. Les figures ci-dessous représentent les cinq outils après 250 mm de contournage sur un bloc de matériau MS43.



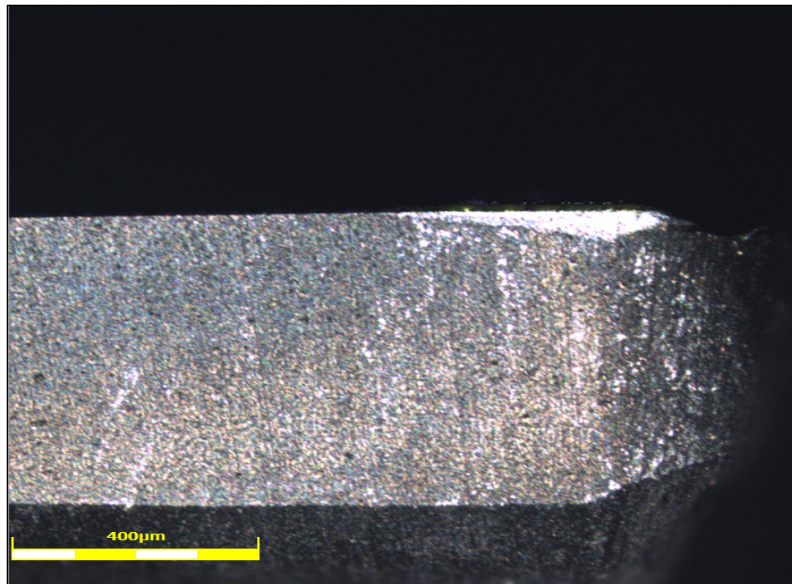


Figure 5-3 : Image montrant l'usure de dépouille d'outil

Par exemple la figure 5.3, montre une usure élevée sur la face de dépouille de l'outil qui affecte fortement la rugosité de la surface, et la précision dimensionnelle de la pièce usinée. Ce défaut est observé dans les arrêtes de tous les outils donc c'est un phénomène normal avec les matériaux composites durs.

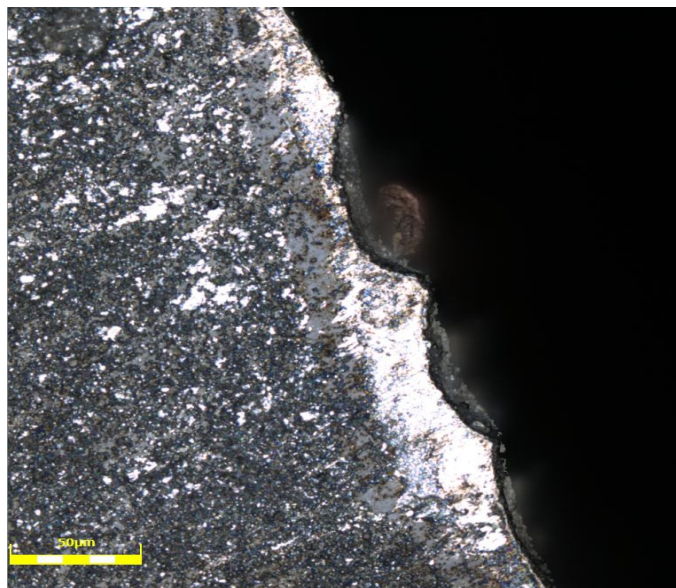


Figure 5-4 : Image montrant les fractures de l'outil

La figure 5.4, présente une partie de la matière de l'outil qui a été enlevé, la surface brillante représente le matériau de base de l'outil usée et sans revêtement du diamant. Ces dommages sont dus à la dureté des particules de siliciums dans la matrice d'aluminium, les poches denses des grains de silicium vu dans le chapitre de caractérisation engendrent ce genre de défauts et des usures sur l'outil qui affectent à leur tour l'état de surface de produit ainsi que la durée de vie de l'outil.

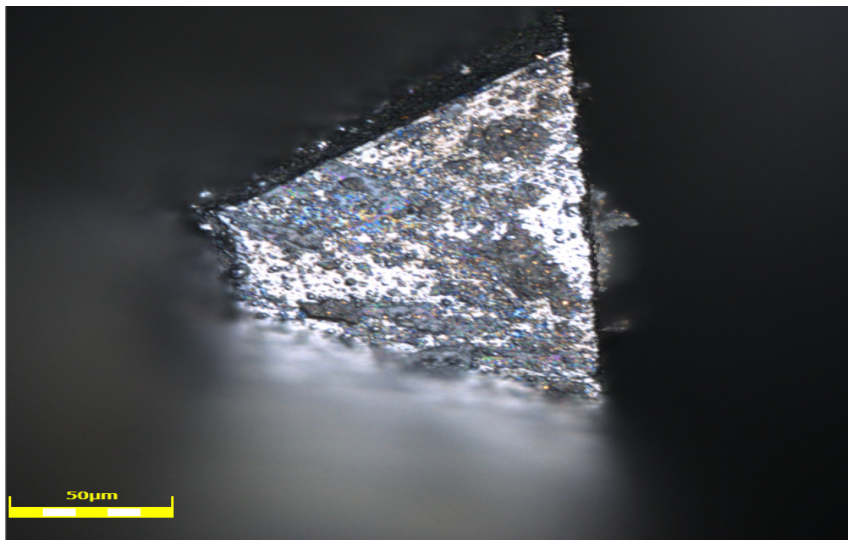


Figure 5-5 : Image montrant l'aluminium fondu et coller sur l'outil de coupe

On observe dans la figure 5.5 ci-dessus, des petits points de matériau fondu sur la face de l'outil que nous ne le voyons pas sur les autres outils, c'est causé par la vitesse de rotation de la broche très élevée, cette augmentation de vitesse est dû au diamètre de l'outil T1 qui est très faible. La vitesse de rotation très élevée empêche le liquide de refroidissement d'accéder à toutes les faces de l'outil, donc l'aluminium fondu s'échappe de la zone de coupe pour se coller sur les différentes faces de l'outil.

## 5.4 Conclusion

À la fin, des essais de validation ont été appliqués pour vérifier l'efficacité et la précision des paramètres suggérés, suite à ces essais et en analysant la rugosité et la microstructure des échantillons de validation pour trois différents outils, on a démontré que le modèle peut nous



fournir des résultats efficaces avec 14.25 % d'erreur maximale. Cependant, en prenant en compte toutes les conditions, nous pouvons traiter le phénomène de l'usure ou bien les défauts qui apparaîtraient sur l'outil de coupe sous l'effet du silicium et malgré le revêtement du diamant sur l'outil.



## CONCLUSION

L'objectif de ce mémoire était d'évaluer l'usinabilité en fraisage des alliages d'aluminium avec un haut pourcentage de silicium MS43 comparativement à Al6061-T6 standard. Pour ce faire nous avons fraisé ces alliages avec différents diamètres d'outil revêtus de diamant et sous lubrification abondante, et avons évalué l'influence des conditions de coupe sur la rugosité de surface, les efforts de coupe, la vibration de la pièce et l'endommagement subsurfacique de la pièce. Les paramètres de coupe étudiés étaient la vitesse de coupe et l'avance par dent pour cinq différents diamètres d'outil. Des recommandations des paramètres de coupe pour chaque outil et détails de la pièce étudiée ont été faites.

Les résultats obtenus prouvent que la vitesse de coupe ainsi que l'avance ont une influence significative sur les paramètres de rugosité pour tous les diamètres d'outil étudiés. Par contre, la contribution de la vitesse de coupe sur cette influence est 46 % plus importance par rapport à l'avance pour cette étude avec l'outil T3. Les paramètres d'amplitudes, décrivant l'état géométrique de la surface, augmentent avec l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance, et ce dans le domaine de variation des facteurs choisis. Il a été constaté aussi que la nature du matériau et les diamètres d'outil n'ont pas de contribution significative sur la rugosité. Cependant, une légère influence est observée pour les surfaces des pièces usinées pour les deux matériaux. Mais, le MS43 a présenté des valeurs de rugosité plus élevées que l'Al6061-T6.

Pour ce qui est des efforts de coupe, des contraintes à tendances compressives dans le sens de déplacement de l'outil et des contraintes de traction perpendiculairement au sens de déplacement de l'outil et sur le plan de coupe ont été enregistrés. L'amplitude des forces dans le sens de déplacement de l'outil a présenté les plus importantes valeurs dont le comportement était proportionnel principalement à la vitesse de coupe. Cependant, pour les efforts de coupe, un comportement a été constaté, en partant des valeurs les plus faibles des paramètres de coupes jusqu'au les valeurs maximales du domaine de l'étude, il y a un point au-delà duquel les efforts de coupe augmentent énormément. Aussi, les échantillons usinés ont été soumis à des mesures de vibration desquels les comportements des amplitudes ont été étudiés. Il s'est

avéré que le matériau et la vitesse de coupe étaient le plus significatifs des facteurs suite à une analyse globale des effets et interactions des contraintes. Le MS43 a présenté une mauvaise performance avec des valeurs des paramètres de coupe les plus élevées, suivi par l'Al6061-T6.

Un modèle expérimental d'optimisation des paramètres de coupe pour 22 diamètres d'outils et de prédiction de la rugosité arithmétique surfacique a été proposé. Suite à ce modèle, une recommandation individuelle pour chaque outil et globale pour une plage d'outils a été proposée dans le but de minimiser la vibration, les efforts de coupes et la rugosité de surface et donc d'augmenter l'usinabilité de l'alliage MS43. Pour les échantillons usinés avec les paramètres de coupe recommandés, on a étudié la microstructure des phénomènes mécaniques dans la zone de coupe, et leurs effets sur la micrographie afin de vérifier l'état de l'alliage après l'usinage et éviter des défauts qui peuvent provoquer des problèmes de fonctionnement de la pièce final. Et d'une façon traditionnelle l'usinabilité se fait par l'usure et les défauts sur l'outil, pour cela on a analysé les défauts qui apparaîtraient sur les différentes faces de coupe de l'outil.

Trois échantillons de validation ont été usinés chez notre partenaire industriel Nétur, les diamètres d'outil ont été choisis entre les 22 outils de la plage ciblés par le modèle expérimental et à partir duquel les paramètres de coupes ont été générés. Les erreurs maximales au niveau des résultats concernant presque toutes les valeurs ne dépassent pas 14.25 %.

## **RECOMMANDATIONS**

Nos recommandations pour les prochains travaux de recherche et qu'ils ont un rapport avec ce qui a été traité dans cette étude sont :

- Élargir la plage des diamètres d'outil et avec différents revêtements, ce qui permet d'analyser l'interaction entre le rayon de l'arrêt de coupe avec les efforts de coupe et l'état de surface ;
- En se basant sur les données de rugosités collectées, les valeurs des efforts mécaniques et les paramètres d'amplitude de vibration, générer des modèles numériques en utilisant un logiciel de conception mécanique. Cette étape nous permettre de comparer les résultats avec ceux obtenus expérimentalement par notre étude statistique ;
- Investiguer pour mesurer l'usure de l'outil suite aux variations des paramètres de coupe et le mode de lubrification, de la géométrie de l'outil (nombre de dents, rayon du coin de coupe et rayon de l'arrête de coupe).



## ANNEXE I

### CHOIX D'OUTILS DE FRAISAGE

Opération	Phase	Numéro d'outil	Référence outil selon catalogue
A	1	T1	END MILL Ø0.125 X 0.625 3 LIPS 0.015R, HARVEY TOOL 32415-C4 page 84
		T2	END MILL Ø0.250 X 0.750 3 LIPS, A345 N61543 NIAGARA (HARVEY TOOL 74510-C3 page 80)
		T3	Dove tail 60° Ø1.250 AB TOOL DX60-1.25, INSERTS D160-1 TIALN
B	2	T1	END MILL Ø0.125 X 0.625 3 LIPS 0.015R, HARVEY TOOL 32415-C4 page 84
		T4	END MILL Ø0.125 X 0.500 4 LIPS 0.015R, HARVEY TOOL 32415-C4 (page 78 avec rayon) (page 48 sans rayon)
		T5	Finition: END MILL Ø0.093 X 0.500 5 LIPS, HARVEY TOOL 66793-C8 page 166
		T2	END MILL Ø0.250 X 0.750 3 LIPS, A345 N61543 NIAGARA (HARVEY TOOL 74510-C3 page 80)
		T6	END MILL Ø0.125 X 0.625 3 LIPS 0.015R, HARVEY TOOL 32415-C4 page 84
	3	T1	END MILL Ø0.125 X 0.625 3 LIPS 0.015R, HARVEY TOOL 32415-C4 page 84
	4	T1	END MILL Ø0.125 X 0.625 3 LIPS 0.015R, HARVEY TOOL 32415-C4 page 84
		T7	END MILL Ø0.375 X 1.000 3 LIPS, A345 N61554 NIAGARA (HARVEY TOOL page 42)
	5	T8	MILL Ø0.5 X 0.625 3 LIPS, AN340 N57894 NIAGARA
		T9	HARVEY TOOL 33302-C3 page 56 (END 0.1094 X 0.375 4 LIPS, C430 EDP:85585 NIAGARA)
	6	T1 et T7	
C	7	T8	MILL Ø0.5 X 0.625 3 LIPS, AN340 N57894 NIAGARA
		Ébauche de la forme géométrique, surface finie	kycoera 3NFSL060-280-06 page 41 ou HARVEY TOOL 36275-C3 page 80
		T6	END MILL Ø0.125 X 0.625 3 LIPS 0.015R, HARVEY TOOL 32415-C4 page 84
		T10	END Ø0.078 X 0.234 4 LIPS 0.015R HARVEY TOOL 28178-C4 page 77





## ANNEXE II

### CHOIX D'OUTILS DE PERÇAGE

Opération	Trous	Diamètre du corps + mandrin		Diamètre de coupe		Longueur totale		Longueur coupante		Diamètre de perçage		Référence outil		
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	Centrage	Perçage	Taraudage ou alésage
Centrage. Perçage et Taraudage	1 12		0.8	0.1	0.1	1.5		0.2			0.1	T1	T3	T9
	2, 13, 14		0.6			1.5		0.2		0.1	0.1	T1	T4	T10
	3		0.3			1.8		0.2		0.1	0.1	T2	T5	T11
	4							0.4		0.2	0.2	T2	T6	T12
	5		0.6			1.5		0.2		0.1	0.1	T1	T4	T10
	6							0.2		0.1	0.1	T2	T5	T11
	7			0.1	0.1			0.1			0.1	T2	T7	T13
	8							0.1		0	0.1	T1	T8	T14
	9							0.2		0.1	0.1	T1	T4	T10
	10, 11							0.2		0.1	0.1	T2	T5	T11



### ANNEXE III

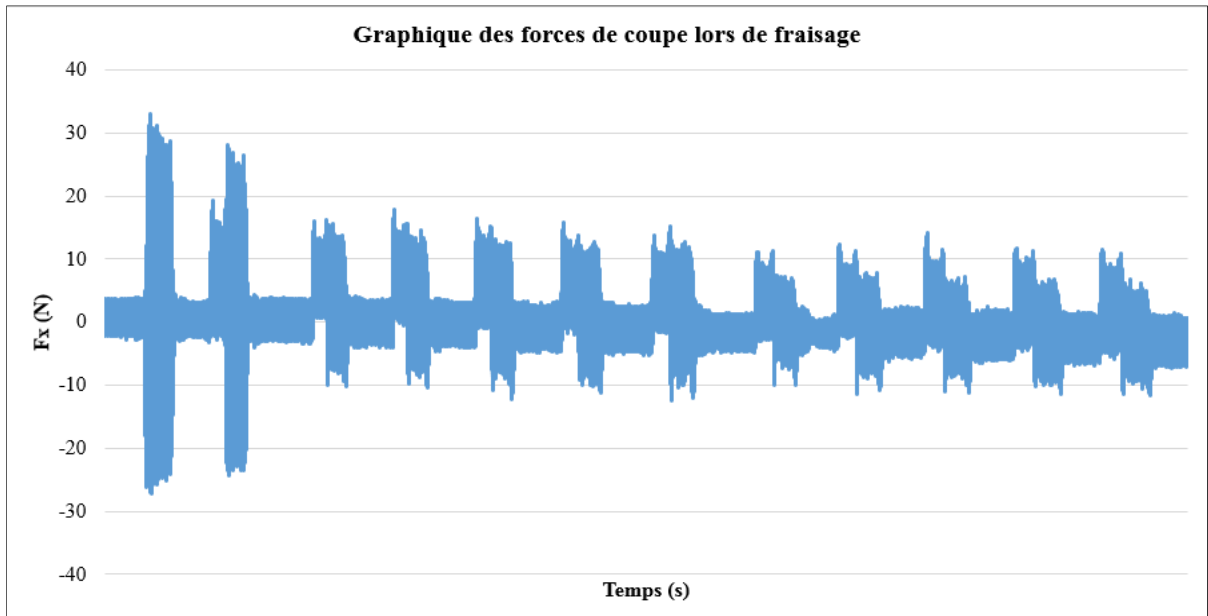
#### DESCRIPTION D'OUTIL SELON LE FOURNISSEUR « NIAGARA »

<b>Numéro d'outil</b>	<b>Description d'outil- Niagara Catalogue</b>
T1	Numéro 0 - 60° HARVEY TOOL 11020-C3 page 37
T2	Numéro 3 - 60° HARVEY TOOL 11050-C3 page 37
T3	Drill 1.6mm Ø0.063 #105-0630.400 kyocera option 2 drill Ø0.055 numéro 105-0550.400 kyocera
T4	Drill #50 Ø0.070 #105-0700.400 kyocera
T5	Drill 2.30mm Ø0.0906 #105-0906.400 kyocera
T6	DRILL 0.2010 4.0D CAR IC, MDS2010MHV SUMITOMO
T7	DRILL 0.1181 3.0D CAR IC, MDW0300HGS3 SUMITOMO
T8	Drill 1.25mm Ø0.0492 #105-0492.400 kyocera
T9	Reamer HARVEY TOOL RSB0625-C3 page 32
T10	Tap #2-56 #1301900103 OSG
T11	Tap #4-40 #1301900203 OSG
T12	Tap #1/4-20 #1301900703 OSG
T13	Reamer Ø0.125 HARVEY TOOL RSB1250-C3 page 34
T14	Threadmill #0-80 HARVEY TOOL 959502-C6 page 288

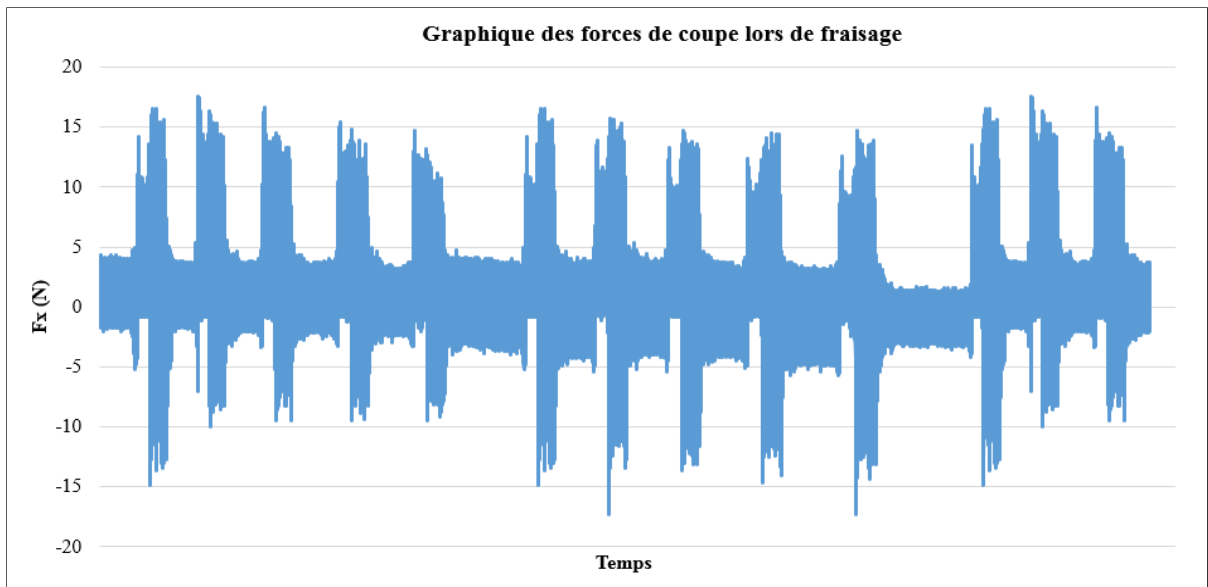


## ANNEXE IV

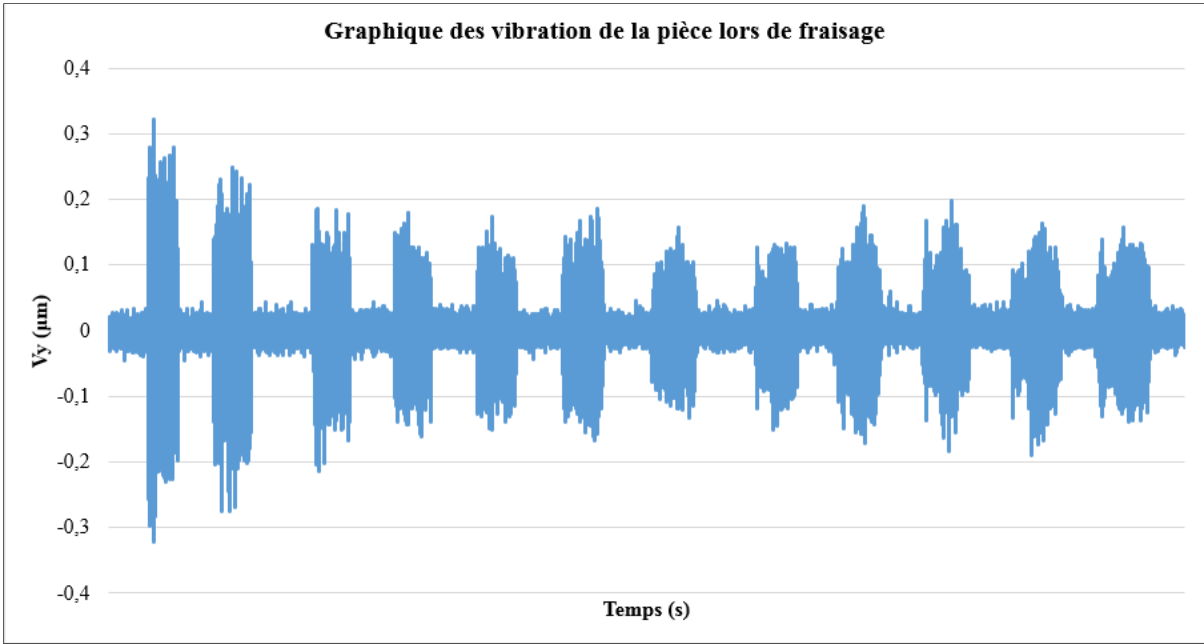
### SPECTRES DES FORCES ET DES VIBRATIONS



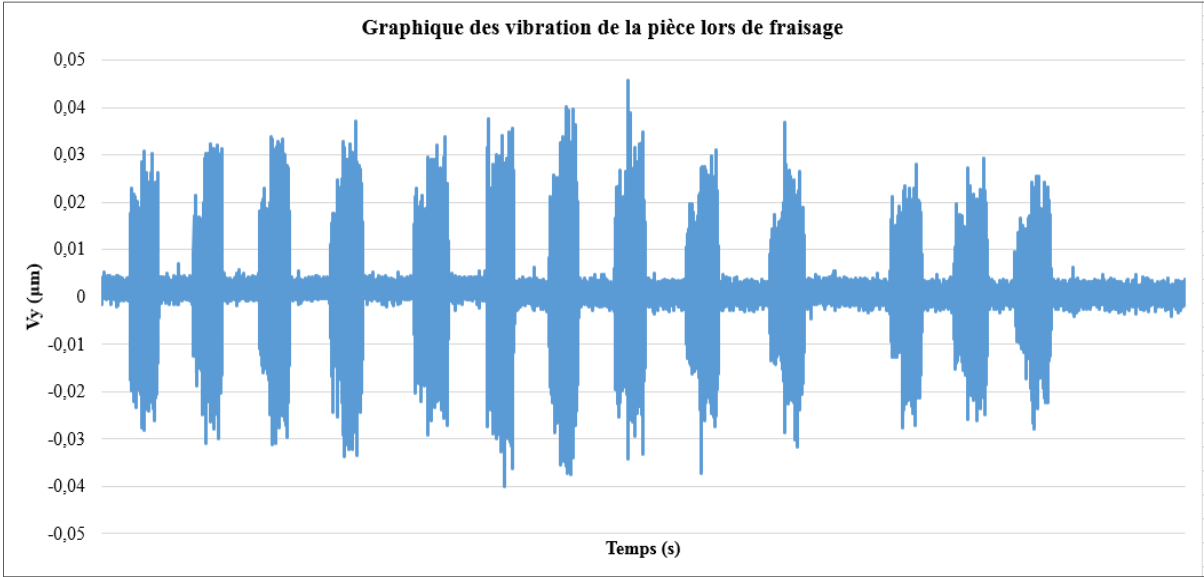
#### Comportement de force de coupe pendant l'usinage MS43



#### Comportement de force de coupe pendant l'usinage Al6061-T6



**Comportement de signaux de vibration pendant l'usinage MS43**



**Comportement de signaux de vibration pendant l'usinage Al6061-T6**

## ANNEXE V

### PARAMÈTRES DE RUGOSITÉ POUR TOUS LES OUTILS ET LES DEUX MATÉRIAUX

Outil T1 Al6061-T6							
No.	Sq[μm]	Ssk	Sku	Sp[μm]	Sv[μm]	Sz[μm]	Sa[μm]
1	0.426	0.21	14.44	15.618	13.035	28.653	0.322
2	0.49	-0.079	5.417	8.587	8.149	16.736	0.381
3	0.41	-0.048	5.188	6.957	4.998	11.956	0.316
4	0.378	0.209	4.812	6.905	5.857	12.762	0.296
5	0.381	0.4	7.803	10.174	3.069	13.243	0.294
6	0.378	0.29	11.788	9.727	7.691	17.417	0.285
7	0.363	0.701	8.898	6.36	3.987	10.347	0.279
8	0.326	0.583	10.315	8.013	3.818	11.832	0.25
9	0.352	0.483	7.331	6.282	4.126	10.408	0.271
10	0.304	0.305	4.832	6.45	3.926	10.376	0.235
11	0.324	0.914	10.736	5.823	3.853	9.677	0.243
12	0.815	0.665	9.027	10.799	16.008	26.806	0.521
13	0.312	0.326	4.802	3.977	4.399	8.376	0.24
14	0.326	-0.135	13.496	9.809	9.676	19.485	0.247
15	0.478	0.042	15.641	10.304	11.239	21.543	0.352
16	0.424	-0.221	11.734	11.707	10.925	22.631	0.313
17	0.385	0.825	42.515	10.129	9.902	20.031	0.269
18	0.322	-0.156	8.882	7.497	8.907	16.405	0.244
19	0.312	0.318	14.196	8.8	9.226	18.026	0.24
20	0.318	0.799	16.82	9.65	7.725	17.374	0.235
21	0.385	1.122	19.952	11.626	7.649	19.275	0.289
22	0.463	8.736	187.736	15.761	8.281	24.043	0.268
23	0.324	1.293	25.36	7.098	7.361	14.46	0.238
24	0.314	0.052	15.07	9.225	7.528	16.753	0.238
25	0.376	0.527	36.405	8.85	10.233	19.084	0.271

<b>Outil T1 MS43</b>							
No.	Sq[μm]	Ssk	Sku	Sp[μm]	Sv[μm]	Sz[μm]	Sa[μm]
1	0.731	0.124	15.657	24.972	20.001	44.973	0.535
2	0.731	0.124	15.657	24.972	20.001	44.973	0.535
3	0.637	-0.306	5.342	14.685	10.085	24.769	0.485
4	0.65	-0.105	7.195	11.74	9.415	21.154	0.489
5	0.516	-0.113	11.992	13.207	10.082	23.288	0.387
6	0.611	1.419	32.608	11.87	9.334	21.204	0.429
7	0.547	-0.139	8.13	11.06	7.925	18.985	0.404
8	0.584	3.585	66.483	11.64	8.482	20.122	0.385
9	0.504	0.2	10.619	9.699	7.168	16.867	0.379
10	0.5	-0.147	6.627	9.389	6.973	16.362	0.373
11	0.562	-0.294	5.707	6.543	7.069	13.612	0.421
12	0.631	-1.562	20.119	7.973	11.258	19.231	0.464
13	0.52	0.083	19.908	13.071	10.081	23.152	0.375
14	0.595	-0.543	7.277	7.781	10.398	18.179	0.444
15	0.807	-0.501	4.253	9.528	12.141	21.668	0.629
16	0.581	-0.435	4.415	6.325	5.649	11.974	0.447
17	0.581	-0.322	3.968	7.631	6.026	13.656	0.454
18	0.463	-0.422	6.083	7.079	6.634	13.712	0.35
19	0.45	-0.391	5.973	5.776	5.738	11.515	0.341
20	0.55	0.055	5.747	7.736	4.859	12.595	0.407
21	0.51	0.512	9.219	5.58	3.212	8.792	0.373
22	0.475	0.414	14.903	7.632	4.651	12.283	0.352
23	0.47	-0.576	5.476	4.64	4.987	9.627	0.356
24	0.472	-0.361	6.457	5.245	4.639	9.884	0.353
25	0.51	-0.522	5.153	4.606	6.228	10.835	0.389



Outil T2 Al6061-T6							
No.	Sq[ $\mu\text{m}$ ]	Ssk	Sku	Sp[ $\mu\text{m}$ ]	Sv[ $\mu\text{m}$ ]	Sz[ $\mu\text{m}$ ]	Sa[ $\mu\text{m}$ ]
1	3.663	0.923	3.879	20.972	14.495	35.467	3.002
2	3.869	1.212	4.277	20.141	10.082	30.223	3.041
3	2.136	0.21	1.993	8.4	8.012	16.412	1.845
4	2.304	0.369	2.408	11.561	7.131	18.692	1.954
5	2.964	1.033	4.604	17.258	9.432	26.69	2.382
6	0.648	-0.064	2.845	3.73	3.818	7.548	0.527
7	0.722	-0.011	2.658	4.412	4.427	8.839	0.591
8	0.676	-0.079	2.869	5.022	4.276	9.298	0.547
9	1.172	-0.228	2.252	4.818	4.535	9.353	0.989
10	1.561	-0.01	1.798	5.877	6.213	12.09	1.365
11	2.975	0.813	3.197	14.987	8.002	22.989	2.455
12	2.706	0.689	2.793	12.17	6.949	19.119	2.267
13	3.653	0.92	3.421	19.149	7.849	26.998	2.984
14	3.697	0.584	2.51	18.023	13.481	31.504	3.133
15	3.451	0.51	2.233	14.131	8.714	22.846	2.96
16	1.687	0.115	1.774	6.994	6.709	13.702	1.484
17	1.722	0.151	1.749	7.443	5.785	13.228	1.517
18	2.174	0.134	1.711	9.078	6.495	15.573	1.923
19	2.271	0.211	1.77	9.764	6.897	16.661	2.003
20	2.392	0.239	1.789	8.935	7.642	16.577	2.105
21	0.585	-0.078	2.941	3.725	3.69	7.415	0.471
22	1.199	0.092	1.917	5.315	4.952	10.267	1.039
23	1.255	0.159	1.871	5.89	5.32	11.209	1.096
24	1.897	0.137	1.703	6.523	5.682	12.205	1.681
25	1.897	0.182	1.91	7.582	5.514	13.097	1.648

<b>Outil T2 MS43</b>							
No.	Sq[ $\mu\text{m}$ ]	Ssk	Sku	Sp[ $\mu\text{m}$ ]	Sv[ $\mu\text{m}$ ]	Sz[ $\mu\text{m}$ ]	Sa[ $\mu\text{m}$ ]
1	0.564	-0.118	5.583	10.26	9.699	19.959	0.433
2	0.566	-0.175	5.859	9.112	8.998	18.11	0.439
3	0.457	-0.385	5.233	3.956	5.742	9.698	0.35
4	0.542	-0.511	5.378	4.763	7.403	12.166	0.416
5	0.516	-0.377	5.25	4.498	5.417	9.916	0.391
6	0.538	0.007	6.72	6.138	3.964	10.102	0.407
7	0.508	-0.324	6.42	5.836	5.181	11.018	0.38
8	0.54	-0.206	7.134	5.84	4.834	10.674	0.401
9	0.481	-0.469	5.351	4.632	4.081	8.713	0.365
10	0.485	-0.038	6.664	5.011	4.271	9.282	0.368
11	0.584	0.036	7.358	5.257	3.841	9.098	0.429
12	0.542	-0.144	7.073	5.782	3.345	9.127	0.407
13	0.593	0.116	7.565	5.44	5.896	11.336	0.437
14	0.549	-0.318	6.496	8.54	7.007	15.546	0.415
15	0.504	-0.171	7.282	7.904	7.242	15.146	0.378
16	0.551	-0.477	5.171	3.568	4.054	7.622	0.415
17	0.526	-0.469	6.433	4.948	6.686	11.635	0.392
18	0.509	-0.572	5.778	5.343	4.421	9.764	0.38
19	0.511	-0.483	5.171	2.958	3.524	6.482	0.383
20	0.514	0.078	7.005	5.603	4.026	9.629	0.382
21	0.548	-0.522	5.138	3.887	5.626	9.513	0.414
22	0.534	-0.154	5.969	5.2	4.37	9.571	0.402
23	0.478	-0.17	4.917	3.527	2.947	6.474	0.364
24	0.513	-0.212	5.518	4.26	4.692	8.952	0.384
25	0.538	-0.332	7.154	3.885	3.84	7.726	0.399

Outil T3 Al6061-T6							
No.	Sq[ $\mu\text{m}$ ]	Ssk	Sku	Sp[ $\mu\text{m}$ ]	Sv[ $\mu\text{m}$ ]	Sz[ $\mu\text{m}$ ]	Sa[ $\mu\text{m}$ ]
1	0.581	-0.33	7.163	9.124	9.215	18.338	0.428
2	0.623	-0.193	5.896	8.398	7.535	15.933	0.463
3	0.603	-0.02	5.928	8.503	7.103	15.607	0.452
4	0.637	-0.262	5.109	7.956	7.738	15.694	0.482
5	0.572	-0.327	5.46	7.212	7.238	14.45	0.429
6	0.593	0.067	6.196	8.227	7.542	15.77	0.442
7	0.578	-0.334	5.802	6.132	6.997	13.128	0.433
8	0.566	-0.092	4.876	4.522	3.88	8.402	0.429
9	0.553	-0.316	4.683	4.496	4.39	8.885	0.417
10	0.562	-0.452	5.622	4.566	4.699	9.265	0.418
11	0.575	-0.087	5.362	4.312	4.141	8.454	0.426
12	0.703	0.801	5.164	4.461	4.525	8.986	0.497
13	0.535	-0.21	8.368	8.504	6.681	15.185	0.395
14	0.522	-0.281	8.411	9.115	8.852	17.967	0.382
15	0.525	-0.104	9.348	7.073	6.325	13.398	0.383
16	0.497	-0.547	6.801	5.216	6.459	11.675	0.368
17	0.527	-0.296	5.194	5.054	5.864	10.919	0.398
18	0.486	-0.502	5.038	4.823	4.734	9.557	0.367
19	0.492	-0.237	6.031	4.734	4.426	9.16	0.363
20	0.5	-0.332	5.424	3.417	3.848	7.265	0.376
21	0.504	-0.474	5.679	4.339	4.531	8.87	0.377
22	0.494	-0.371	4.442	3.06	3.314	6.374	0.374
23	0.491	-0.403	5.16	3.149	3.798	6.947	0.366
24	0.497	-0.675	5.571	3.288	3.651	6.939	0.368
25	0.486	-0.543	5.298	4.519	3.566	8.084	0.362

<b>Outil T3 MS43</b>							
No.	Sq[ $\mu\text{m}$ ]	Ssk	Sku	Sp[ $\mu\text{m}$ ]	Sv[ $\mu\text{m}$ ]	Sz[ $\mu\text{m}$ ]	Sa[ $\mu\text{m}$ ]
1	0.811	0.298	3.062	11.985	8.705	20.69	0.655
2	0.845	0.217	3.212	8.688	7.308	15.996	0.68
3	0.824	0.261	2.89	6.971	5.847	12.817	0.666
4	0.835	0.293	2.943	8.625	7.603	16.228	0.677
5	0.773	0.237	2.984	6.116	6.243	12.359	0.625
6	0.772	0.262	2.913	5.234	5.54	10.774	0.619
7	0.613	0.17	3.595	4.991	5.943	10.934	0.488
8	0.69	0.318	3.293	6.224	5.392	11.616	0.554
9	0.71	0.733	7.523	7.899	6.382	14.28	0.554
10	0.71	0.206	2.901	5.059	5.357	10.415	0.572
11	0.567	0.096	3.487	5.785	4.935	10.72	0.452
12	0.558	0.018	2.91	5.246	3.836	9.082	0.451
13	0.468	-0.121	3.807	4.689	5.227	9.915	0.373
14	0.437	0.164	4.078	7.326	5.763	13.089	0.347
15	0.509	0.129	4.083	6.446	6.284	12.729	0.412
16	0.605	0.143	3.078	6.27	6.729	12.999	0.491
17	0.631	0.251	3.093	6.259	6.086	12.345	0.513
18	0.678	0.318	2.593	5.723	6.023	11.746	0.558
19	0.645	0.377	3.653	6.394	4.747	11.141	0.515
20	0.694	0.792	9.625	5.328	8.207	13.535	0.525
21	0.498	-0.14	3.663	5.129	5.779	10.909	0.398
22	0.457	-0.173	4.15	4.705	5.422	10.127	0.363
23	0.497	0.023	3.119	3.76	4.168	7.928	0.402
24	0.517	0.06	2.996	4.154	3.959	8.114	0.42
25	0.513	0.144	2.948	5.481	4.574	10.054	0.419

Outil T4 Al6061-T6							
No.	Sq[ $\mu\text{m}$ ]	Ssk	Sku	Sp[ $\mu\text{m}$ ]	Sv[ $\mu\text{m}$ ]	Sz[ $\mu\text{m}$ ]	Sa[ $\mu\text{m}$ ]
1	1.066	0.381	3.108	12.581	10.481	23.063	0.861
2	1.04	0.195	3.203	10.602	10.781	21.383	0.839
3	0.931	0.482	3.338	10.876	8.153	19.029	0.745
4	0.845	0.296	3.146	7.743	6.169	13.912	0.673
5	0.985	0.489	2.812	10.812	9.947	20.759	0.806
6	1.032	0.436	3.131	10.481	8.726	19.207	0.825
7	1.542	1.091	4.709	10.678	9.459	20.137	1.174
8	1.911	1.329	5.587	11.637	8.142	19.779	1.414
9	1.848	0.713	3.384	12.284	9.856	22.14	1.464
10	2.367	0.681	3.598	11.654	9.137	20.791	1.851
11	1.37	0.236	2.32	8.594	6.394	14.987	1.148
12	1.252	0.158	2.475	6.48	5.944	12.425	1.034
13	1.676	0.81	5.321	12.364	6.13	18.494	1.309
14	0.654	0.253	3.762	10.692	7.489	18.181	0.52
15	0.58	0.677	8.2	9.247	8.993	18.24	0.453
16	0.741	0.203	2.926	7.299	5.333	12.631	0.606
17	0.866	0.308	2.954	7.24	7.084	14.324	0.704
18	0.907	0.256	2.977	8.416	6.232	14.648	0.733
19	1.295	0.697	3.166	9.178	6.23	15.408	1.037
20	1.496	0.726	3.584	8.59	7.319	15.909	1.181
21	1.934	0.411	2.205	8.48	6.769	15.249	1.641
22	1.985	0.394	2.294	9.551	6.176	15.727	1.673
23	2.695	0.552	2.403	11.292	7.309	18.6	2.27
24	2.641	0.453	2.191	10.54	8.37	18.91	2.253
25	2.724	0.304	2.004	9.458	7.933	17.392	2.346

<b>Outil T4 MS43</b>							
No.	Sq[ $\mu\text{m}$ ]	Ssk	Sku	Sp[ $\mu\text{m}$ ]	Sv[ $\mu\text{m}$ ]	Sz[ $\mu\text{m}$ ]	Sa[ $\mu\text{m}$ ]
1	1.267	0.451	3.711	9.474	8.243	17.717	1.012
2	0.904	0.26	4.74	7.049	6.161	13.21	0.701
3	0.95	0.491	5.11	7.428	5.571	12.999	0.736
4	1.247	0.387	3.179	10.989	6.754	17.742	1.002
5	1.214	0.363	3.042	8.708	6.983	15.691	0.975
6	0.902	0.561	7.091	7.418	5.09	12.508	0.689
7	1.13	2.205	15.112	9.164	8.055	17.219	0.739
8	0.765	-0.15	3.904	5.801	6.324	12.126	0.596
9	0.82	0.367	6.537	7.722	5.797	13.519	0.62
10	0.781	0.183	4.401	6.083	5.921	12.004	0.614
11	0.869	0.243	6.322	8.26	7.687	15.948	0.658
12	0.893	0.039	4.365	6.607	6.523	13.13	0.692
13	0.807	0.186	5.151	6.203	5.048	11.252	0.619
14	0.838	0.117	4.015	9.145	8.945	18.09	0.665
15	0.877	-0.069	4.568	10.92	7.596	18.516	0.687
16	0.886	0.007	3.948	7.338	6.967	14.305	0.699
17	0.868	0.32	5.701	8.829	6.261	15.09	0.662
18	0.774	-0.076	3.809	5.696	6	11.695	0.606
19	0.853	-0.229	3.57	5.1	5.5	10.6	0.674
20	0.76	-0.04	3.618	4.638	5.181	9.819	0.6
21	0.849	0.322	4.914	8.211	5.191	13.402	0.661
22	1.031	1.218	7.515	5.894	5.003	10.897	0.756
23	0.744	-0.046	3.769	5.012	4.913	9.925	0.581
24	0.781	0.031	3.782	5.056	4.887	9.943	0.614
25	0.839	0.112	3.368	5	4.441	9.441	0.665

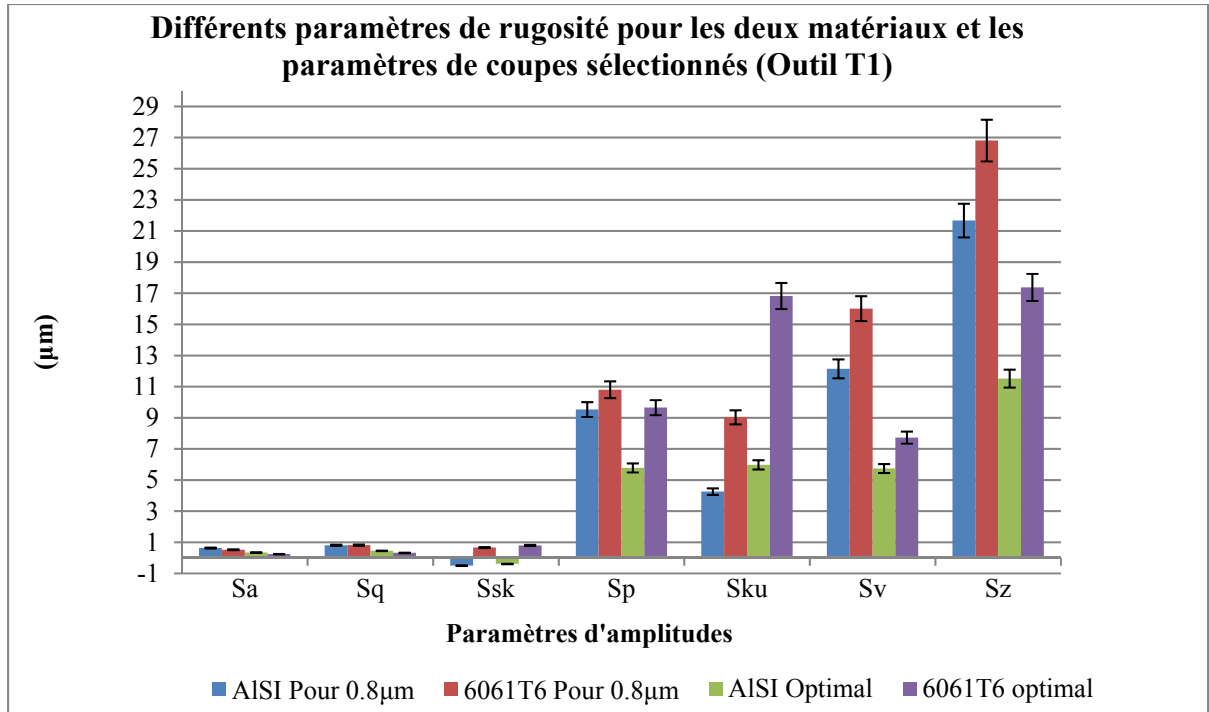
Outil T5 Al6061-T6							
No.	Sq[ $\mu\text{m}$ ]	Ssk	Sku	Sp[ $\mu\text{m}$ ]	Sv[ $\mu\text{m}$ ]	Sz[ $\mu\text{m}$ ]	Sa[ $\mu\text{m}$ ]
1	0.811	0.298	3.062	11.985	8.705	20.69	0.655
2	0.845	0.217	3.212	8.688	7.308	15.996	0.68
3	0.824	0.261	2.89	6.971	5.847	12.817	0.666
4	0.835	0.293	2.943	8.625	7.603	16.228	0.677
5	0.773	0.237	2.984	6.116	6.243	12.359	0.625
6	0.772	0.262	2.913	5.234	5.54	10.774	0.619
7	0.613	0.17	3.595	4.991	5.943	10.934	0.488
8	0.69	0.318	3.293	6.224	5.392	11.616	0.554
9	0.71	0.733	7.523	7.899	6.382	14.28	0.554
10	0.71	0.206	2.901	5.059	5.357	10.415	0.572
11	0.567	0.096	3.487	5.785	4.935	10.72	0.452
12	0.558	0.018	2.91	5.246	3.836	9.082	0.451
13	0.468	-0.121	3.807	4.689	5.227	9.915	0.373
14	0.437	0.164	4.078	7.326	5.763	13.089	0.347
15	0.509	0.129	4.083	6.446	6.284	12.729	0.412
16	0.605	0.143	3.078	6.27	6.729	12.999	0.491
17	0.631	0.251	3.093	6.259	6.086	12.345	0.513
18	0.678	0.318	2.593	5.723	6.023	11.746	0.558
19	0.645	0.377	3.653	6.394	4.747	11.141	0.515
20	0.694	0.792	9.625	5.328	8.207	13.535	0.525
21	0.498	-0.14	3.663	5.129	5.779	10.909	0.398
22	0.457	-0.173	4.15	4.705	5.422	10.127	0.363
23	0.497	0.023	3.119	3.76	4.168	7.928	0.402
24	0.517	0.06	2.996	4.154	3.959	8.114	0.42
25	0.513	0.144	2.948	5.481	4.574	10.054	0.419

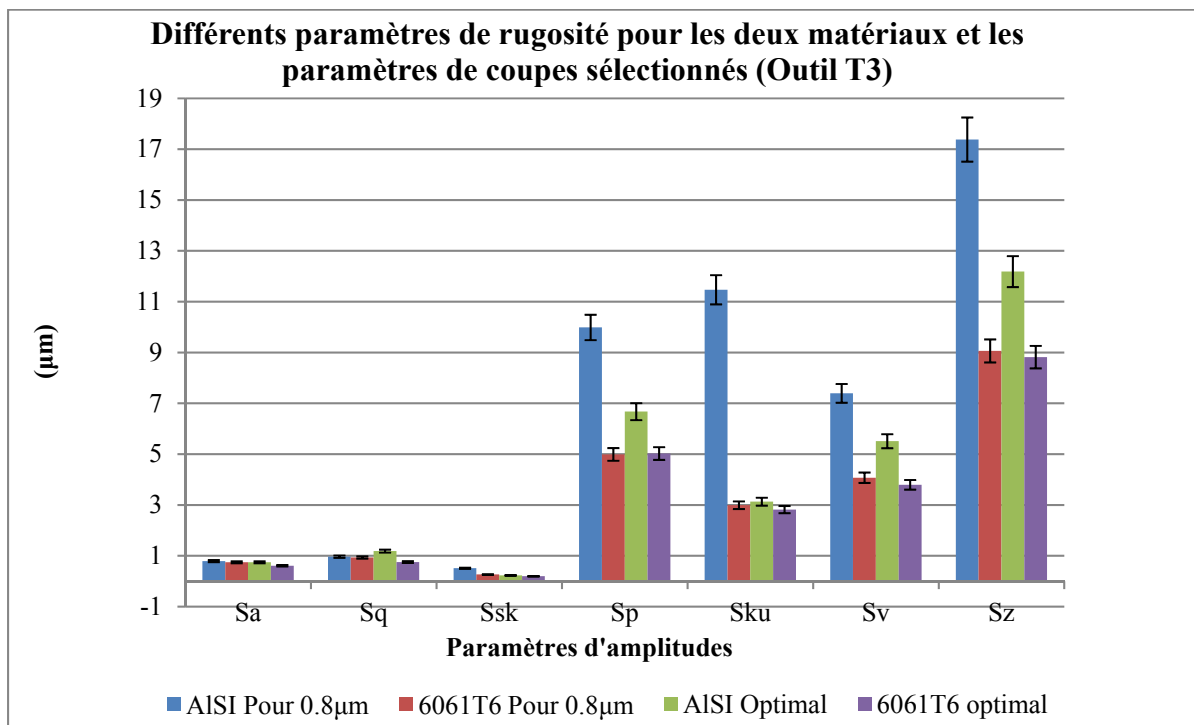
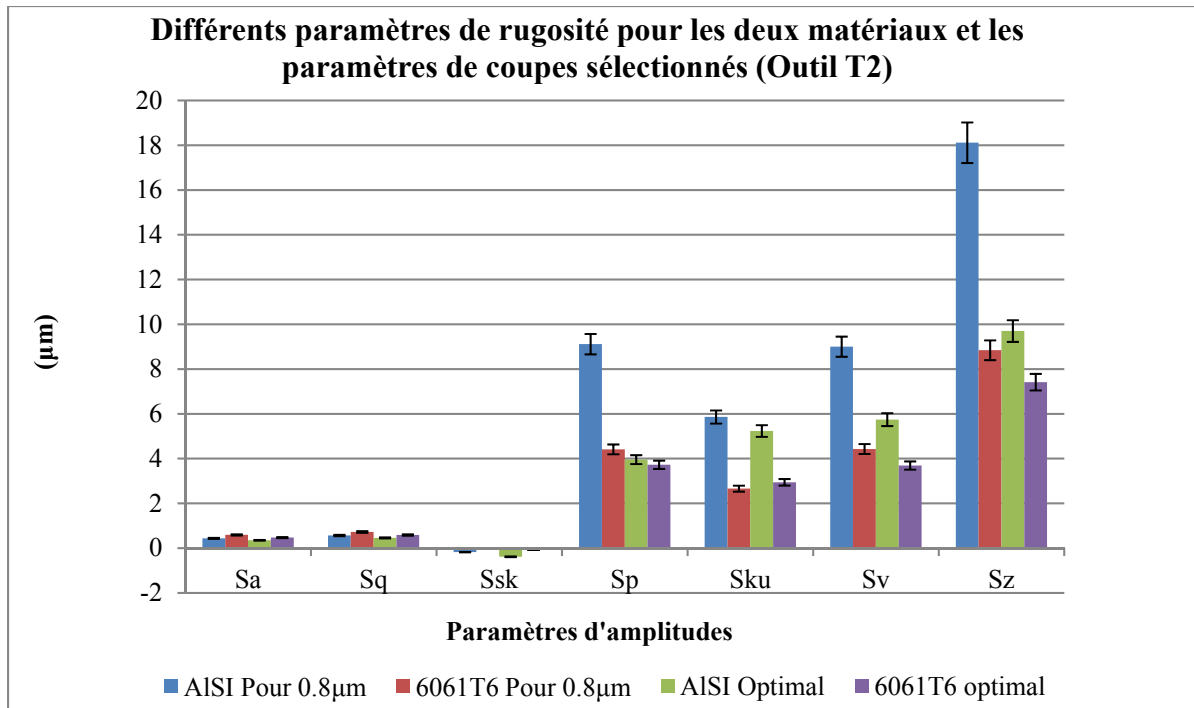
<b>Outil T5 MS43</b>							
No.	Sq[ $\mu\text{m}$ ]	Ssk	Sku	Sp[ $\mu\text{m}$ ]	Sv[ $\mu\text{m}$ ]	Sz[ $\mu\text{m}$ ]	Sa[ $\mu\text{m}$ ]
1	0.581	-0.33	7.163	9.124	9.215	18.338	0.428
2	0.623	-0.193	5.896	8.398	7.535	15.933	0.463
3	0.603	-0.02	5.928	8.503	7.103	15.607	0.452
4	0.637	-0.262	5.109	7.956	7.738	15.694	0.482
5	0.572	-0.327	5.46	7.212	7.238	14.45	0.429
6	0.593	0.067	6.196	8.227	7.542	15.77	0.442
7	0.578	-0.334	5.802	6.132	6.997	13.128	0.433
8	0.566	-0.092	4.876	4.522	3.88	8.402	0.429
9	0.553	-0.316	4.683	4.496	4.39	8.885	0.417
10	0.562	-0.452	5.622	4.566	4.699	9.265	0.418
11	0.575	-0.087	5.362	4.312	4.141	8.454	0.426
12	0.703	0.801	5.164	4.461	4.525	8.986	0.497
13	0.535	-0.21	8.368	8.504	6.681	15.185	0.395
14	0.522	-0.281	8.411	9.115	8.852	17.967	0.382
15	0.525	-0.104	9.348	7.073	6.325	13.398	0.383
16	0.497	-0.547	6.801	5.216	6.459	11.675	0.368
17	0.527	-0.296	5.194	5.054	5.864	10.919	0.398
18	0.486	-0.502	5.038	4.823	4.734	9.557	0.367
19	0.492	-0.237	6.031	4.734	4.426	9.16	0.363
20	0.5	-0.332	5.424	3.417	3.848	7.265	0.376
21	0.504	-0.474	5.679	4.339	4.531	8.87	0.377
22	0.494	-0.371	4.442	3.06	3.314	6.374	0.374
23	0.491	-0.403	5.16	3.149	3.798	6.947	0.366
24	0.497	-0.675	5.571	3.288	3.651	6.939	0.368
25	0.486	-0.543	5.298	4.519	3.566	8.084	0.362

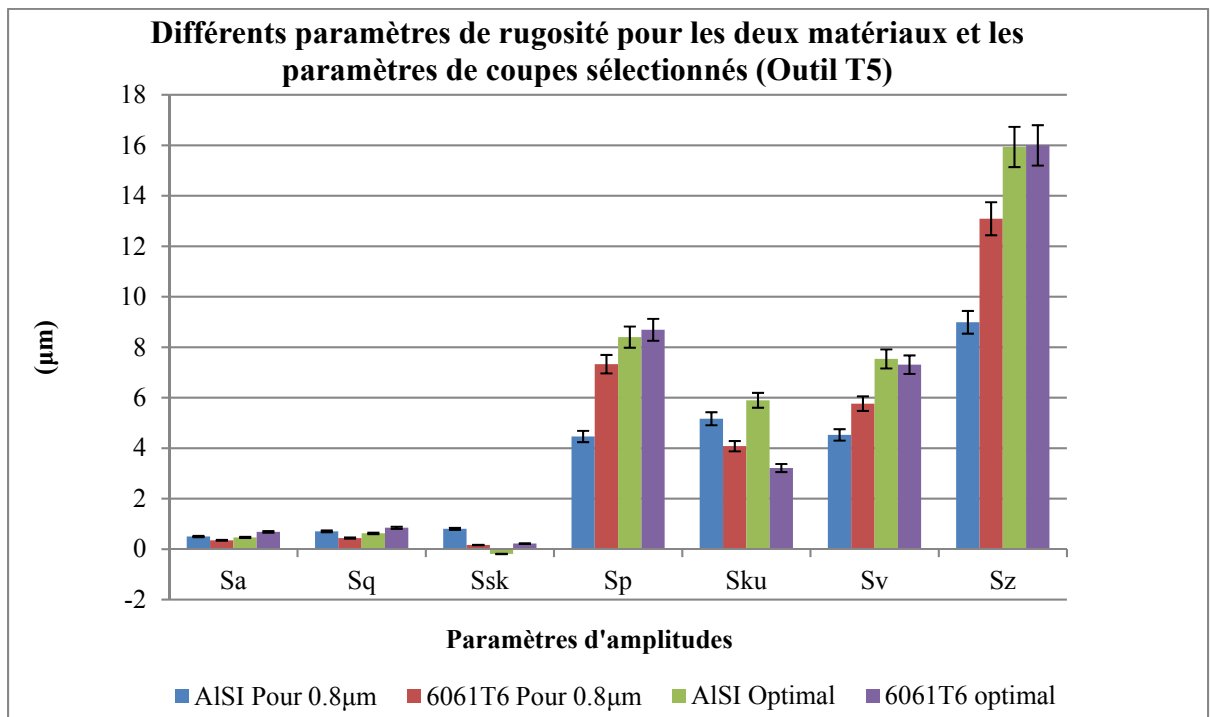
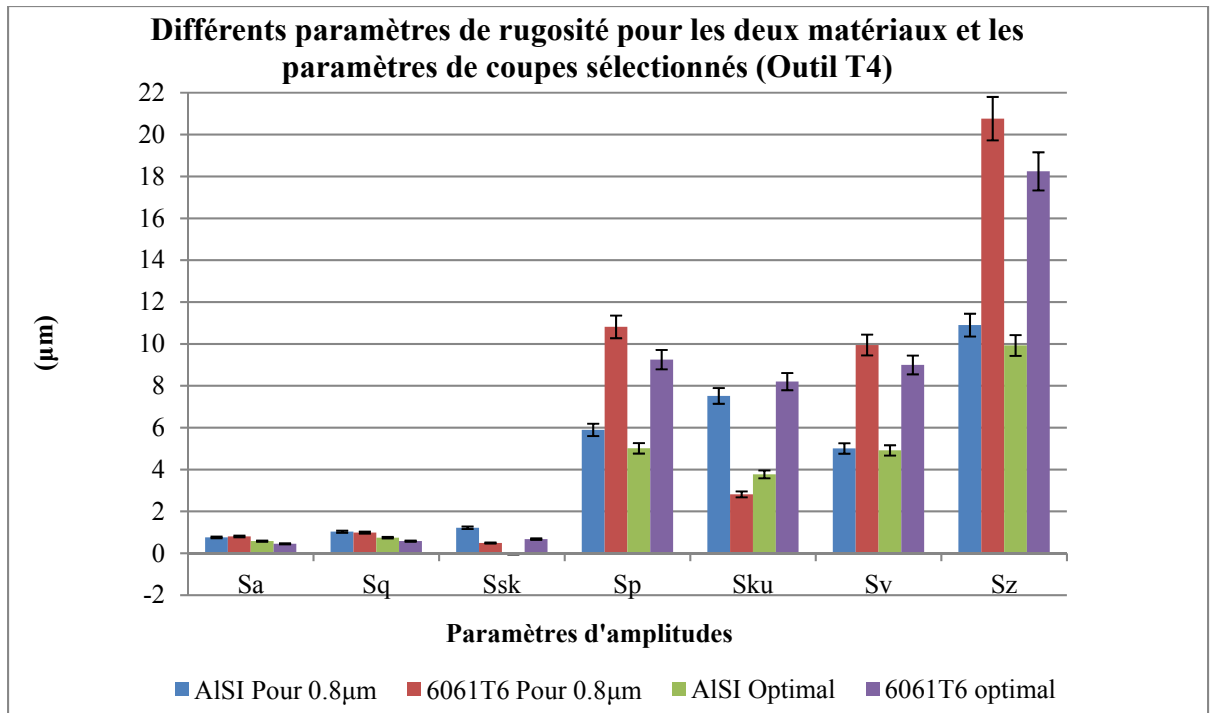


## ANNEXE VI

### DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DE RUGOSITÉ POUR LES DEUX MATÉRIAUX ET LES PARAMÈTRES DE COUPES SÉLECTIONNÉS







## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aidibe, Ali, Mojtaba Kamali Nejad, Antoine Tahan, Mohammad Jahazi et Sylvain G Cloutier. 2016. « A proposition for new quality 3D indexes to measure surface roughness ». *Procedia CIRP*, vol. 46, p. 327-330.
- Alshmri, F, HV Atkinson, SV Hainsworth, C Haidon et SDA Lawes. 2014. « Dry sliding wear of aluminium-high silicon hypereutectic alloys ». *Wear*, vol. 313, n° 1, p. 106-116.
- Altan, Taylan, Blaine Lilly et YC Yen. 2001. « Manufacturing of dies and molds ». *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 50, n° 2, p. 404-422.
- Ammula, S. C., et Y. B. Guo. 2005. « Surface Integrity of Al 7050-T7451 and Al 6061-T651 Induced by High Speed Milling ». In. SAE International. < <http://dx.doi.org/10.4271/2005-01-3346> >.
- Andrewes, Caroline J. E., Hsi-Yung Feng et W. M. Lau. 2000a. « Machining of an aluminum/SiC composite using diamond inserts ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 102, n° 1-3, p. 25-29.
- Andrewes, Caroline JE, Hsi-Yung Feng et WM Lau. 2000b. « Machining of an aluminum/SiC composite using diamond inserts ». *Journal of materials processing technology*, vol. 102, n° 1, p. 25-29.
- Arsenault, RJ. 1984. « The strengthening of aluminum alloy 6061 by fiber and platelet silicon carbide ». *Materials Science and Engineering*, vol. 64, n° 2, p. 171-181.
- Balazinski, M. (pp. 1-100.). 2009. "note de cours MEC4530". Montréal, .
- Baptista, R, et JF Antune Simoes. 2000. « Three and five axes milling of sculptured surfaces ». *Journal of materials processing technology*, vol. 103, n° 3, p. 398-403.
- Bezerra, A. A., A. R. Machado, A. M. Souza Jr et E. O. Ezugwu. 2001. « Effects of machining parameters when reaming aluminium-silicon (SAE 322) alloy ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 112, n° 2-3, p. 185-198.
- Bhowmick, Sukanta, et Ahmet T. Alpas. 2008. « Minimum quantity lubrication drilling of aluminium-silicon alloys in water using diamond-like carbon coated drills ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, n° 12-13, p. 1429-1443.
- Birol, Yücel. 2007. « Microstructural evolution during annealing of a rapidly solidified Al-12Si alloy ». *Journal of alloys and compounds*, vol. 439, n° 1, p. 81-86.

- Box, George EP, William Gordon Hunter et J Stuart Hunter. 1978. *Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building*, 1. JSTOR.
- Campbell, C. E., L. A. Bendersky, W. J. Boettinger et R. Ivester. 2006. « Microstructural characterization of Al-7075-T651 chips and work pieces produced by high-speed machining ». *Materials Science and Engineering: A*, vol. 430, n° 1–2, p. 15-26.
- Carrilero, M. S., R. Bienvenido, J. M. Sánchez, M. Álvarez, A. González et M. Marcos. 2002. « A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning processes of AA2024 Al–Cu alloy ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, n° 2, p. 215-220.
- Chaussumier, Michel, Catherine Mabru, Majid Shahzad, Rémy Chieragatti et Farhad Rezai-Aria. 2013. « A predictive fatigue life model for anodized 7050 aluminium alloy ». *International Journal of Fatigue*, vol. 48, p. 205-213.
- Choy, HS, et KW Chan. 2002. « Enhanced strategy for milling corners ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 216, n° 8, p. 1135-1154.
- Davis, FA, et TS Eyre. 1994. « The effect of silicon content and morphology on the wear of aluminium-silicon alloys under dry and lubricated sliding conditions ». *Tribology International*, vol. 27, n° 3, p. 171-181.
- Gangopadhyay, Soumya, Ranadip Acharya, Ajay Kumar Chattopadhyay et Vikas Gulabrao Sargade. 2010. « EFFECT OF CUTTING SPEED AND SURFACE CHEMISTRY OF CUTTING TOOLS ON THE FORMATION OF BUL OR BUE AND SURFACE QUALITY OF THE GENERATED SURFACE IN DRY TURNING OF AA6005 ALUMINIUM ALLOY ». *Machining Science and Technology*, vol. 14, n° 2, p. 208-223.
- Gómez-Parra, A., M. Álvarez-Alcón, J. Salguero, M. Batista et M. Marcos. 2013. « Analysis of the evolution of the Built-Up Edge and Built-Up Layer formation mechanisms in the dry turning of aeronautical aluminium alloys ». *Wear*, vol. 302, n° 1–2, p. 1209-1218.
- Goupy, Jacques, et Lee Creighton. 2006. *Introduction aux plans d'expériences-3ème édition-Livre+ CD-Rom*. Dunod.
- Harun, Mohd, IA Talib et AR Daud. 1996. « Effect of element additions on wear property of eutectic aluminium-silicon alloys ». *Wear*, vol. 194, n° 1-2, p. 54-59.
- ISO4287. « <http://www.digitalsurf.fr/fr/guide-parametres-surfaciques-champ.html> ».

- Iwata, Kazuaki, et Kanji Ueda. 1980. « Fundamental analysis of the mechanism of built-up edge formation based on direct scanning electron microscope observation ». *Wear*, vol. 60, n° 2, p. 329-337.
- Kanda, K., S. Takehana, S. Yoshida, R. Watanabe, S. Takano, H. Ando et F. Shimakura. 1995. « Application of diamond-coated cutting tools ». *Surface and Coatings Technology*, vol. 73, n° 1, p. 115-120.
- Kouam, J, V Songmene, M Balazinski et P Hendrick. 2013. « Dry, semi-dry and wet machining of 6061-T6 aluminium alloy ». *Dry, Aluminium Alloys—New Trends in Fabrication and Applications*, p. 199-221.
- Li, Jiang, Fuguo Li, Jun Cai, Ruiting Wang, Zhanwei Yuan et Fengmei Xue. 2012. « Flow behaviour modeling of the 7050 aluminum alloy at elevated temperatures considering the compensation of strain ». *Materials & Design*, vol. 42, p. 369-377.
- Monreal, Manuel, et Ciro A Rodriguez. 2003. « Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling ». *Computer-Aided Design*, vol. 35, n° 4, p. 395-401.
- Mulazimoglu, MH, RAL Drew et JE Gruzelski. 1989. « Electrical conductivity of aluminium-rich Al-Si-Mg alloys ». *Journal of materials science letters*, vol. 8, n° 3, p. 297-300.
- Mustafa, Ay, et Karagol Tanju. 2011. « Investigation of the machinability of the Al 7075 alloy using DLC coated cutting tools ». *Scientific Research and Essays*, vol. 6, n° 1, p. 44-51.
- Neşeli, Süleyman, Süleyman Yıldız et Erol Türkeş. 2011. « Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology ». *Measurement*, vol. 44, n° 3, p. 580-587.
- Nikanorov, S. P., M. P. Volkov, V. N. Gurin, Yu A. Burenkov, L. I. Derkachenko, B. K. Kardashev, L. L. Regel et W. R. Wilcox. 2005. « Structural and mechanical properties of Al-Si alloys obtained by fast cooling of a levitated melt ». *Materials Science and Engineering: A*, vol. 390, n° 1-2, p. 63-69.
- Niknam, Seyed Ali, Jules Kouam et Victor Songmene. 2016. « Experimental investigation on part quality and metallic particle emission when milling 6061-T6 aluminium alloy ». *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 18, n° 1-2, p. 120-137.
- Pawade, RS, Suhas S Joshi et PK Brahmkankar. 2008. « Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718 ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, n° 1, p. 15-28.

- Ramanujam, Radhakrishnan, Nambi Muthukrishnan et Ramasamy Raju. 2011. « Optimization of cutting parameters for turning Al-SiC(10p) MMC using ANOVA and grey relational analysis ». *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 12, n° 4, p. 651-656.
- Rao, Balkrishna, et Yung C. Shin. 2001. « Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, n° 12, p. 1763-1781.
- Songmene, Victor, Riad Khettabi et Jules Kouam. 2012. « Dry high-speed machining: a cost effective and green process ». *International Journal of Manufacturing Research*, vol. 7, n° 3, p. 229-256.
- Sreejith, PS. 2008. « Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions ». *Materials letters*, vol. 62, n° 2, p. 276-278.
- Suraratchai, M., J. Limido, C. Mabru et R. Chieragatti. 2008. « Modelling the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminium alloy ». *International Journal of Fatigue*, vol. 30, n° 12, p. 2119-2126.
- Wilks, J. 1980. « Performance of diamonds as cutting tools for precision machining ». *Precision Engineering*, vol. 2, n° 2, p. 57-72.
- Zhang, Qiguo, Jianxun Qiu, Yi Wang et Mingyuan Gu. 2007. « Studies on machinability of Al/Sip + SiCp composite materials ». *Journal of Materials Science*, vol. 42, n° 14, p. 5845-5850.